

Diplomová práce

Návrh alternativní pohonné jednotky pro prototyp vozidla E-Buggy

Design of an Alternative Drive for the E-Buggy Vehicle Prototype

Autor práce: Bc. Lukáš Januška

Ostrava 2021

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Januška**

Studijní program: N0715A270004 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma: **Návrh alternativní pohonné jednotky pro prototyp vozidla E-Buggy**
Design of an alternative drive for the E-Buggy vehicle prototype

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí současného stavu a vytvoření požadavků pro alternativní pohonnou jednotku.
2. Průzkum v oblasti dostupných pohonných jednotek a výběr konkrétních komponent vhodných pro použití v E-Buggy.
3. Zapojení a testování pohonné jednotky v podmínkách laboratoře.
4. Shrnutí dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DONCKER, Rik de, Duco W. J PULLE a André VELTMAN, c2011. Advanced electrical drives: analysis, modeling, control. Dordrecht: Springer. Power systems. ISBN 978-94-007-0179-3.
- [2] HROMÁDKO, Jan, 2012. Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [3] HUGHES, Austin, c2006. Electric motors and drives: fundamentals, types, and applications. 3rd ed. Boston: Elsevier/Newnes. ISBN 0-7506-4718-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Pawlenka**

Datum zadání: 30.11.2020

Datum odevzdání: 23.04.2021

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá zhodnocením současně používaných motorů LEM200-D13, jejich záporných vlastností a rešerší trhu pro výběr adekvátní náhrady. Dále je zde popsán nově vybraný elektromotor Motenergy ME 1304, jeho výkonové parametry a zapojení pomocí nových měničů.

Práce dále zahrnuje popis možného řešení chlazení a výpočet velikosti chladiče pro soustavu čtyř elektromotorů ME1304.

Návrh nového uložení elektromotoru v E-Buggy, popis jednotlivých součástí a výrobní výkresy pro tyto součásti. Závěr práce se věnuje zapojení elektromotoru k měniči a připojení k motorové brzdě pro měření výkonových parametrů v laboratořích na fakultě materiálově technologické, společně s uvedením dosažených výsledků.

Klíčová slova

Elektromotor ME1304, chlazení, motorová brzda, měření výkonu, uložení

Abstract

This diploma thesis deals with the evaluation of currently used LEM200-D13 engines, their negative properties and market research for the selection of adequate replacement. Furthermore, the newly selected electric motor Motenergy ME 1304, its power parameters and connection using new inverters are described here.

The work also includes a description of a possible cooling solution and calculation of the size of the cooler for a system of four ME1304 electric motors.

Design of a new electric motor housing in E-Buggy, description of individual components and production drawings for these components. The conclusion of the work is devoted to the connection of the electric motor to the converter and the connection to the motor brake for measuring power parameters in laboratories at the Faculty of Materials Technology, together with the results obtained.

Key words

Electric motor ME1304, cooling, engine dynamometer, measuring power, draft

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Tomáši Pawlenkovi, za odborné vedení, předmětné rady a cenné zkušenosti.

OBSAH

Seznam zkratk a použitých symbolů	7
ÚVOD.....	9
1. Úvod do elektromotorů.....	10
1.1 Stejnoseměrný motor s cizím buzením.....	11
1.2 Asynchronní motor	12
1.3 Reluktanční motor.....	13
1.4 Synchronní motor s permanentními magnety	14
2. Zhodnocení současného stavu	15
2.1 Elektromotor Lynch LEM200-D135	15
2.1.1 Technická specifikace LEM200-D135	16
2.1.2 Zhodnocení motoru LEM-D135	16
2.2 Elektromotor Engiro 205W-04013-ABC.....	17
2.2.1 Technická specifikace.....	17
2.2.2 Zhodnocení motoru Engiro 205W-04013-ABC	18
2.3 Elektromotor DANA TM4 IPM-200-50	18
2.3.1 Technická specifikace.....	19
2.3.2 Zhodnocení motoru DANA TM4 IPM-200-50	19
2.4 Elektromotor Motenergy ME1616.....	20
2.4.1 Technická specifikace.....	20
2.4.2 Zhodnocení motoru Motenergy ME1616	21
2.5 Elektromotor Motenergy ME1304.....	21
2.5.1 Technická specifikace.....	22
2.5.2 Zhodnocení motoru Motenergy ME1304	22
2.5.3 Měníč Sevcon gen4 size 4	23
2.5.4 Schéma zapojení Sevcon gen 4 size 4.	24
2.5.5 Schéma zapojení Sevcon gen4 size 4 v E-Buggy.....	25
3. Měření výkonových parametrů.....	26
3.1 Motorová brzda Superflow SP-902	26
3.2 Spojení motorové brzdy a elektromotoru ME1304	27
3.3 Uchycení motoru pro testování na motorové brzdě.....	29
4. Chlazení	30

4.1	Návrh chlazení pomocí 3 okruhů.....	30
4.1.1	Chlazení motorů přední nápravy.	30
4.1.2	Chlazení motorů zadní nápravy.....	31
4.2	Návrh chlazení pomocí 1 okruhu.....	32
4.3	Chladicí médium.....	32
4.4	Chladič.....	33
4.5	Návrh velikosti činné plochy chladiče.....	33
5.	Návrh uložení elektromotoru ME 1304 v E-Buggy	38
5.1	Příruba ME1304.....	39
5.2	Horní a dolní držák pro přírubu	40
5.3	Domek pro ložisko.....	40
5.4	Náboj-spojení elektromotoru s kardanem.....	41
5.5	Uložení v modelu E-Buggy	42
6.	Měření parametrů na motorové brzdě	43
	Závěr.....	48
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	50
	Seznam příloh.....	52

Seznam zkratk a použitých symbolů

P	[W]	výkon
M _k	[N·m]	krouticí moment
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost
n	[s ⁻¹]	otáčky
Re	[MPa]	mez kluzu
σ _{Dt}	[MPa]	maximální dovolené napětí
k	[-]	součinitel bezpečnosti
τ _k	[MPa]	napětí v krutu
τ _{Dk}	[MPa]	maximální
W _k	[mm ²]	průřezový modul
J _p	[m ⁴]	kvadratický moment průřezu
D, d	[mm]	průměr
F	[N]	síla
l	[mm]	délka
p	[MPa]	otlačení
p _{Dov}	[MPa]	maximální dovolené otlačení
S	[mm ²]	plocha
t _l	[mm]	výška
b	[mm]	šířka
τ _{DovS}	[MPa]	maximální dovolené napětí ve stříhu
Q _{G12+}	[W]	teplo chladicí kapaliny
q	[-]	součinitel účinnosti
ρ _{vzd}	[kg·m ⁻³]	hustota vzduchu
P _{atm}	[Pa]	atmosférický tlak
T _{vzd}	[°C]	teplota vzduchu
r _{vzd}	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	hmotnostní plynová konstanta vzduchu
T _{G12+,max}	[K]	maximální teplota chladicí kapaliny
S _{chl}	[m ²]	plocha chladiče
c _{p,vzd}	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita vzduchu
v _{vzd}	[m·s ⁻¹]	rychlost vzduchu
P _{elmot}	[W]	výkon elektromotoru
Q _{vzd,max}	[kW]	maximální teplo předané vzduchu
ṁ _{vzduch}	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok vzduchu

\dot{m}_{chlk}	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	hmotnostní průtok chladicí kapaliny
ρ_{chlk}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^3]$	hustota chladicí kapaliny
V_p	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}]$	objemový průtok chladicí kapaliny

ÚVOD

Tato diplomová práce se v teoretické části krátce věnuje problematice elektromotorů, jejich odlišností a způsobu využití. Poté je zde popsán současně používaný elektromotor LEM200-D135, který je vzduchem chlazený a disponuje nízkým stupněm krytí, což představuje problém vzhledem k povaze vozidla.

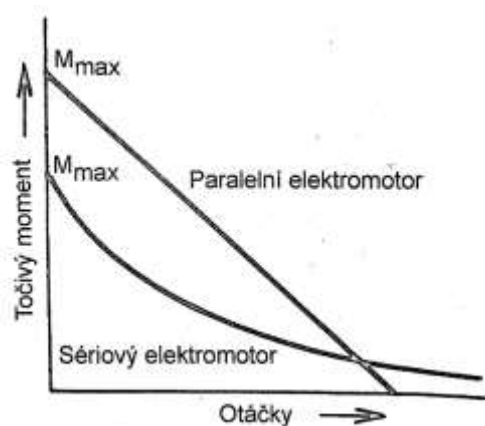
Je zde uvedena rešerše současně volně dostupných elektromotorů, jejich výkonové grafy a také případná odůvodnění proč by nebyl vhodným nástupcem současných elektromotorů. Následuje popis nově vybraného elektromotoru spolu s novými měniči pro ovládání.

Práce dále zahrnuje popis možného řešení chlazení a výpočet velikosti chladiče pro soustavu čtyř elektromotorů ME 1304.

Další kapitola se věnuje samotnému uložení elektromotorů ME 1304 v E-Buggy, návrhu jednotlivých součástí pro toto uložení a také jejich popisu. Jsou zde uvedeny orientační váhy pro dané součásti a v příloze nalezneme dílenské výkresy těchto součástí.

1.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením

Stejnosměrný motor s cizím buzením je jednoduchý na regulaci otáček v širokém pásmu otáček, kontinuální přechod z jízdy na brždění a výhodné tahové charakteristiky. Kvůli tomu jsou po dlouhou dobu využívány pro pohon elektrických vozidel. Ve statoru najdeme budící vinutí, které vybudí magnetický tok. Pomocí kartáče a komutátoru je přiveden proud do otáčejícího se rotoru. Komutátor zajišťuje také periodickou změnu proudu do cívky kotvy, která rotuje ve vnějším magnetickém poli. Přitom točivý moment působí pořád ve směru rotace. V závislosti na zapojení kotvy a budícího vedení sériově nebo paralelně, rozlišujeme sériový nebo paralelní elektromotor.[12]



Graf 1 Charakteristiky paralelního a sériového stejnosměrného elektromotoru. [12]

Sériový elektromotor disponuje dobrým počátečním točivým momentem, ale ten rychle klesá se stoupajícími otáčkami. U elektrovozidel se proto volí paralelní elektromotor, z důvodu pomaleji klesajícím točivým momentem a to lineárně s otáčkami motoru. Elektronická regulace napájení vinutí elektromotoru pomocí tyristorů z křemíku s pravoúhlým průběhem napětí se používá k regulaci celého elektromotoru. Změnou frekvence a amplitudy se nastavuje zvolená střední hodnota proudu. Stejnosměrné motory je možné silně přetěžovat. Při dodávání výkonu po dobu 1 hodiny je přetížitelnost 20% nad trvalým výkonem. Krátkodobě například při rozjezdu je přetížitelnost až 100%. Hraniční otáčky stejnosměrných elektromotorů jsou omezeny asi na 7000 min^{-1} . [15]

Výhody: technicky propracované

jednoduše řízené a cenově výhodné

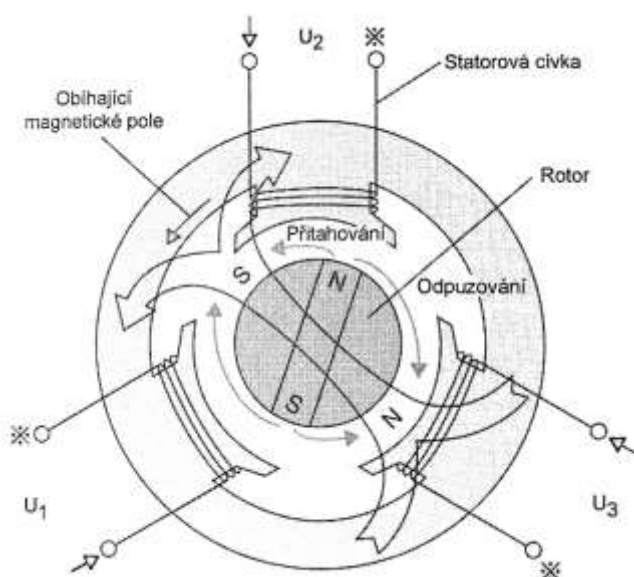
Nevýhody: komutátor a kartáče jsou náchylné k poruchám a musí se udržívat

maximální obvodová rychlost je omezena rotační frekvencí

účinnost a velikost výkonu je menší než u střídavých elektromotorů

1.2 Asynchronní motor

Stejnosemné motory jsou u elektrovozidel čím dál víc vytlačovány střídavými motory. Zejména kvůli podstatné výhodě třífázového asynchronního motoru, že odpadá vinutí kotvy a kolektor. Magnetický tok je do statoru přiváděn rovněž budícím vinutím, ale rotačním napětím proměnné amplitudy a frekvence, jenž musí být odvozena ze stejnosměrného napětí na trakční baterii. Pro regulaci otáček a tahové síly musí být proměnné napětí i frekvence. Výkonový obvod pro splnění těchto regulačních požadavků je vysoce nákladný. [12]



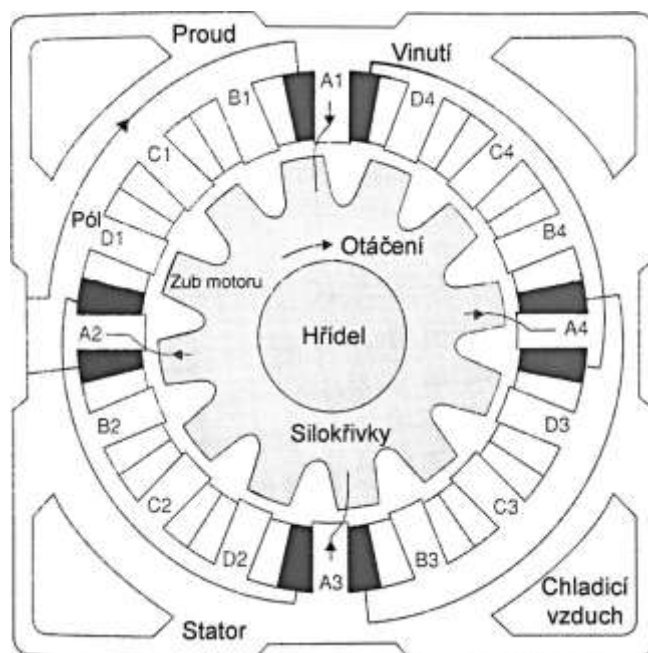
Obr. 2 Synchronní motor s permanentním buzením. [12]

Vinutí statoru je složeno alespoň ze tří svazků, které jsou vzájemně pootočený o 120° , napájeno je třífázovým proudem. Vinutí vytváří točivé magnetické pole, které má kruhovou frekvenci střídavého proudu ω . Asynchronní elektromotor je oproti stejnosměrnému motoru při stejném výkonu podstatně menší a lehčí. Elektromotor je také konstrukčně jednodušší, robustní, bezúdržbový a vysoce přetížitelný. Může dosáhnout až $20\,000$ otáček min^{-1} . [12]

Střídavé motory mají oproti stejnosměrným velkou výhodu v tom, že většinou nemusí být obíhajícímu rotoru přiveden žádný proud, jelikož ho vybuzuje magnetické pole. Vlivem indukovaného proudu, působí na kotvu síly magnetického pole a ta se otáčí. V závislosti na tom zdali se rotor otáčí synchronně nebo asynchronně s točivým polem, rozdělujeme na elektromotory na asynchronní a synchronní motory. [12]

1.3 Reluktanční motor

Tyto motory jsou založeny na principu dlouho známé technice reluktančních krokových motorů. Přes fakt, že lze reluktanční krokový motor jednoduše a levně vyrobit, byl dlouhé roky málo využíván pro jeho nerovnoměrnost, to znamená, závislost velikosti točivého momentu na poloze rotoru. To lze částečně vyrovnáno vhodným řízením elektromotoru. Pólové nástavce ve tvaru ozubeného kola jsou na rotoru z měkkého železa. Výkonová elektronika mění magnetické pole a proud a tím je uveden rotor do rotace. [12]



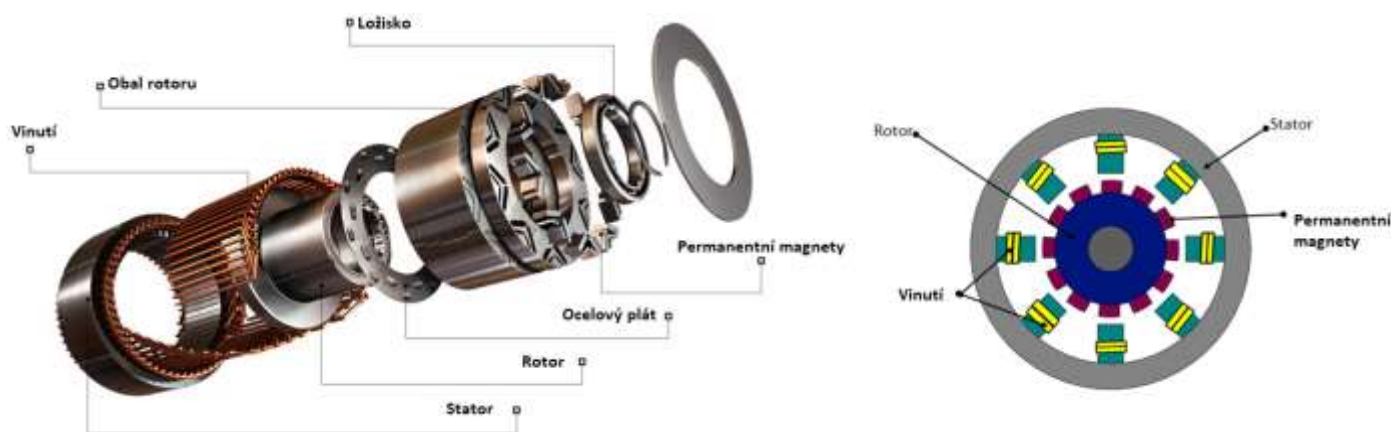
Obr. 3 Řízený reluktanční elektromotor. [12]

Reluktanční elektromotor se rozbíhá asynchronně, ale poté je jeho chod synchronní. Koncepce reluktance poukazuje na magnetický odpor, který rotor v magnetickém poli představuje. Díky bezhmotným mezer zubů v rotoru, je vytvářen rotorem reluktančního elektromotoru velmi malý točivý moment a také umožňuje velmi vysoké zrychlení. [15]

- Výhody:
- vysoký točivý moment při nízkých otáčkách
 - robustní konstrukce
 - malé náklady na údržbu
 - stabilní běh motoru při vypnutí jedné nebo více fází
- Nevýhody:
- točivý moment není rovnoměrný
 - může nastat zvýšená hladina hluku

1.4 Synchronní motor s permanentními magnety

Princip synchronního motoru s permanentními magnety (dále jen PMSM) je založen na interakci konstantního rotorového magnetického pole s točivým polem na statoru. Přivedením sinusového elektrického proudu na trojfázové vinutí statoru vzniká právě toto točivé magnetické pole. Permanentní magnety vytváří na rotoru magnetické pole, takovéto řešení umožňuje absenci snímače pozice rotoru a nevyžaduje složité elektronické části. Buzení PMSM je z principu fungování prováděno pomocí permanentních magnetů a je tedy možné vyloučit ztráty na budícím vinutí. Díky tomu je účinnost u těchto motorů daleko vyšší než u klasických synchronních motorů. Také rotor je menší a lehčí, a proto, je schopen vyvinout stejný nebo vyšší výkon při kompaktnějších rozměrech. Tyto elektromotory disponují vysokou momentovou přetížitelností, která je až desetkrát větší než u jiných typů motorů. Oproti indukčním motorům zde permanentní magnety zvyšují magnetický tok ve vzduchové mezeře motoru, a tak je celkový moment výrazně vyšší. [16]



Obr. 4 Modelové a schématické znázornění PMSM.[16]

Přes všechny výhody mají PMSM i své negativní vlastnosti. Elektromotory s permanentními magnety mají nevýhodu v nemožnosti odbudít, což se může negativně projevit při zkratu. Dále taky nezanedbatelná cena magnetů kvůli náročnější technologii při výrobě a případných opravách. Při poruše nebo zvýšené teplotě (v řádech stovek) může dojít k odmagnetování. [16]

2. Zhodnocení současného stavu

Tato kapitola se bude zabývat průzkumem současně používaného motoru LEM200-D135, jeho nevýhod a následně průzkumu vhodnějších alternativ pro prototyp vozidla E-Buggy, který vznikl na katedře materiálů a technologií pro automobily. Bateriový box je tvořen Li-ion články typu INR18650 M36T od společnosti LG. Celkové shrnutí parametrů bateriového boxu jsou v Tab. 1, která je i směrodatná při výběru vhodné alternativy motoru.

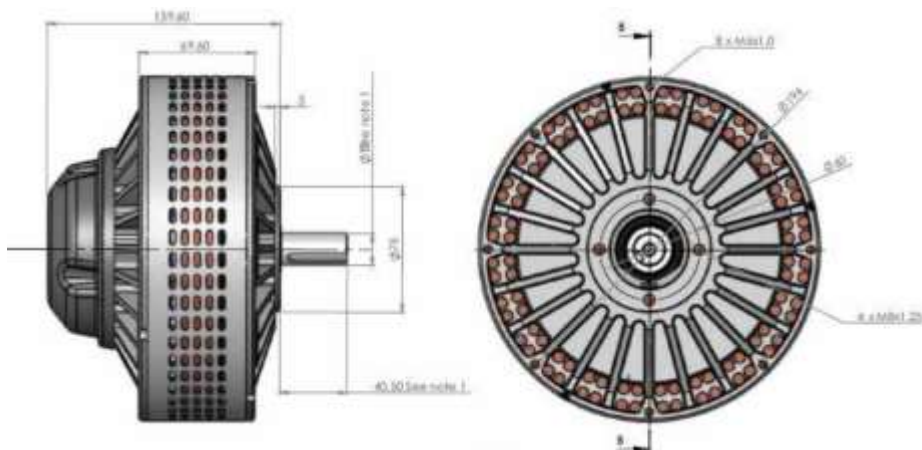
Tab. 1 Vlastnosti bateriového boxu. [11]

Nominální napětí	48 V
Pracovní rozsah napětí	42 V – 58.8 V
Maximální proud	665 A
Kapacita bateriového boxu	23.28 kW/h

2.1 Elektromotor Lynch LEM200-D135

V současnosti používaný stejnosměrný elektromotor LEM200-D135, jenž je na Obr. 5, s permanentními magnety nese výhodu ve vysoké efektivitě v poměru jeho velikosti a disponovaným výkonem. [1]

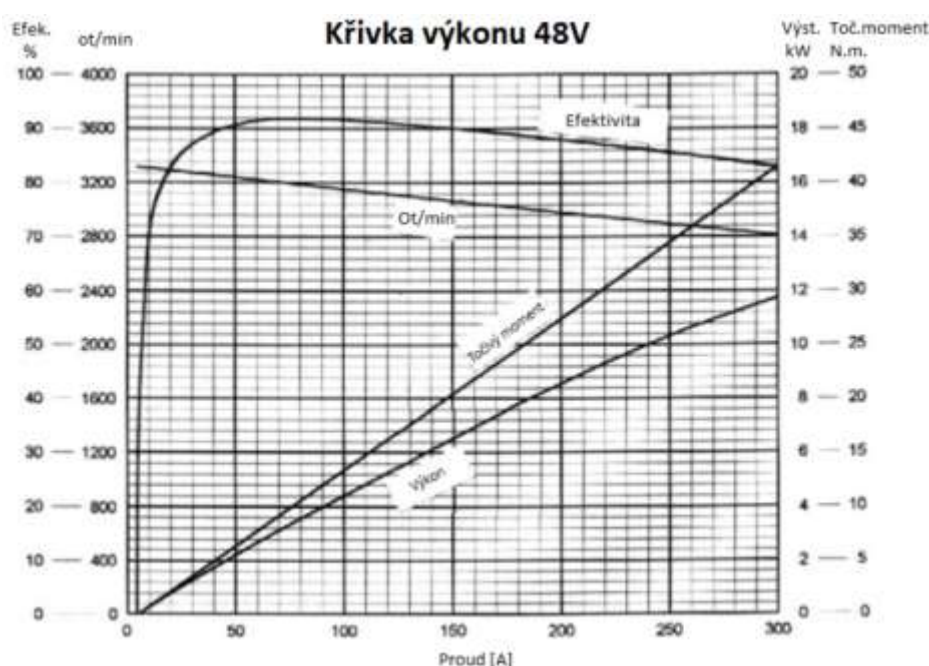
Konstrukčně je tento motor jednoduchý bez vysokých nároků na výměnu dílčích komponentů. Lze ho využít pro pohon elektro kol, motokár, menších lodí nebo také elektromobilů s nízkou hmotností. [2]



Obr. 5 Elektromotor LEM-D135 se základními rozměry. [1]

2.1.1 Technická specifikace LEM200-D135

Elektromotor má pracovní rozsah napětí mezi 24 až 84 V. Na velikosti použitého napětí potom závisí maximální možné otáčky rotoru. Z konstanty, kterou uvádí výrobce, je možné vypočítat maximální otáčky, u tohoto elektromotoru je to 45 otáček na každý volt. Při napětí 48V je maximální výkon 8,7kW a maximální točivý moment 27,5N.m. při konstantním proudu 200A. Průběh točivého momentu, výkonu, efektivita a otáček v závislosti na dodaném proudu vyjadřuje Graf 2. Doporučený proud výrobcem pro dlouhodobé užívání je 200A, ale je možno jej krátkodobě zvýšit až na 250A (1 minuta) nebo 350A po dobu 5 sekund. [17]



Graf 2 Průběh jednotlivých křivek výkonu při napětí 48V.

2.1.2 Zhodnocení motoru LEM-D135

Tento elektromotor je kvalitním produktem anglické firmy Lynch Motor Company Ltd. Je využíván v mnoha aplikacích po celém světě. Ať už se jedná o pohon lodí, malých elektro aut nebo čtyřkolek. Nevýhodou u tohoto elektromotoru je velmi malý stupeň krytí, který je pouze IP20. Což znamená možné proniknutí malých cizích předmětů a bez jakékoliv ochrany vůči vniknutí vody. V praxi to znamená, že jeho využití u projektu E-Buggy není úplně vhodný vzhledem k předpokladu, že tato E-Buggy by měla jezdit i v terénu, kde může dojít buď k vniknutí cizího předmětu přímo do motoru, nebo jeho zanesení bahnem, které bude mít negativní vliv na chlazení samotného motoru.

2.2 Elektromotor Engiro 205W-04013-ABC

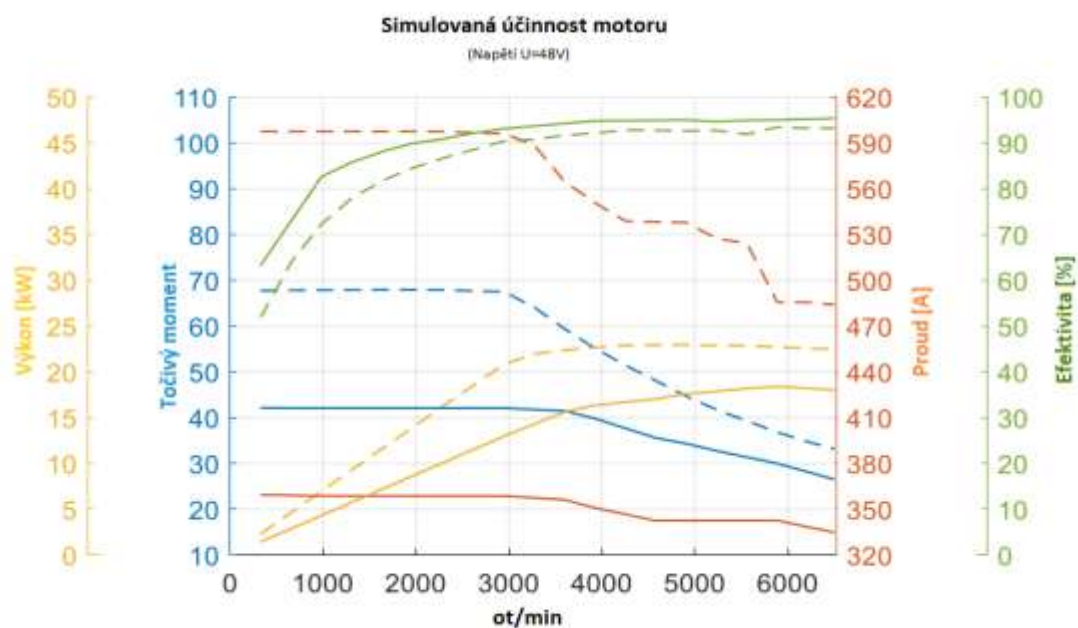
Motor společnosti Engiro, která sídlí v Německém městě Aachen, nesoucí označení 205W-04013-ABC jenž je na Obr. 6. Také disponuje permanentními magnety, ale od současného používaného motoru je vodou chlazený.[3]



Obr. 6 Elektromotor Engiro 205W-04013-ABC. [3]

2.2.1 Technická specifikace

Elektromotor má pracovní rozsah napětí 48-200V. Dokáže vyprodukovat až 14kW výkonu a 92N.m. točivého momentu při nominálním napětí 48V a proudu 358A. Maximální efektivita 96% a poskytuje vysoký stupeň krytí s označením IP65/IP69k. To v praxi znamená, že je zcela chráněn proti prachu a vniknutí cizích předmětů. Zároveň dokáže odolávat stříkající vodě, případně čištění parními tryskami. [3]



Graf 3 Simulovaná efektivita motoru při napětí 48V. [3]

2.2.2 Zhodnocení motoru Engiro 205W-04013-ABC

Elektromotor od firmy Engiro je další alternativou pro nahrazení současného motoru LEM-D135. Má dobré výkonové parametry a ve spojení s vysokým stupněm krytí by ho mohl důstojně zastoupit. Avšak výrobcem udávané napětí od 48V, je pro naši aplikaci vysoké, jelikož se na našem bateriovém boxu pohybuje napětí v rozmezí od 42V do 58,8V. Dalším faktorem neumožňujícím výběr tohoto elektromotoru je jeho rozměr. Vzhledem k faktu, že E-Buggy je již sestavená a je tedy potřeba přihlídnout i na velikost samotného motoru, který se svou délkou 257mm nevejde.

Tab. 2 Souhrn výkonových parametrů Engiro 205W-04013-ABC.

Výkon	14 kW
Točivý moment	92 Nm
Účinnost	96%
Pracovní napětí	48-200V
Konstantní proud	150 A
Špičkový proud (doba)	350 A (60s)
Maximální otáčky	3500 ot/min

2.3 Elektromotor DANA TM4 IPM-200-50

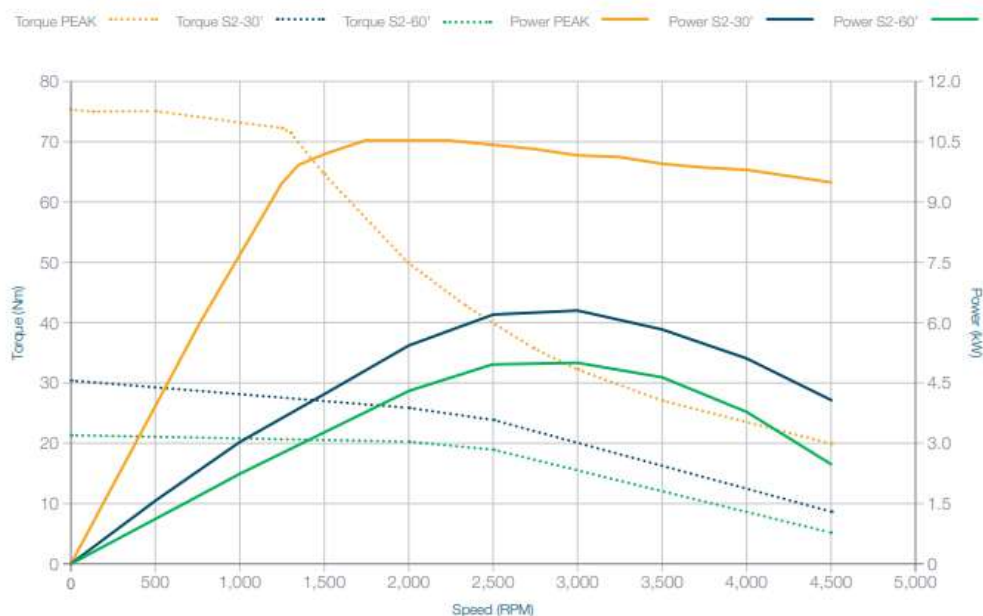
Firma sídlící v kanadském Québecu, a se pobočkami po Evropě i Asii má ve své nabídce motor IPM-200-50 na Obr. 7. Jedná se také o elektromotor s permanentními magnety.



Obr. 7 Elektromotor IPM 200-50 firmy Dana TM4.[6]

2.3.1 Technická specifikace

Elektromotor IPM 200-50 má pracovní rozsah napětí od 24V do 96V a maximální proudové zatížení ve špičce 450A. Dosahuje přitom výkonu až 10,5kW a 75Nm, což s přihlédnutím na váhu samotného motoru, která je 15kg z něj činí velmi efektivní elektromotor. Jeho délka je pouhých 120mm a průměr 231mm. [6]



Graf 4 Výkonnostní graf elektromotoru IPM 200-50. [6]

2.3.2 Zhodnocení motoru DANA TM4 IPM-200-50

Elektromotor IPM-200-50 se jeví jako ideální nástupce současného motoru LEM200-D135, dosahuje podobných výkonů a rozměrově je také velmi podobný. Avšak je taky chlazený pouze vzduchem, i když disponuje větším stupněm krytí a to IP65, což zajišťuje ochranu proti prachu a vniknutí tryskající vodě. Vzhledem k aplikaci motoru do E-Buggy je pravděpodobné, že se motory mohou zanést bahnem a chladicí účinek by tím velice klesl a s tím i účinnost.

Tab. 3 Souhrn výkonových parametrů IPM-200-50.

Výkon	10,5 kW
Točivý moment	75 Nm
Účinnost	>90%
Pracovní napětí	24-96V
Konstantní proud	200 A
Špičkový proud (doba)	350 A (60s)
Maximální otáčky	7000 ot/min

2.4 Elektromotor Motenergy ME1616

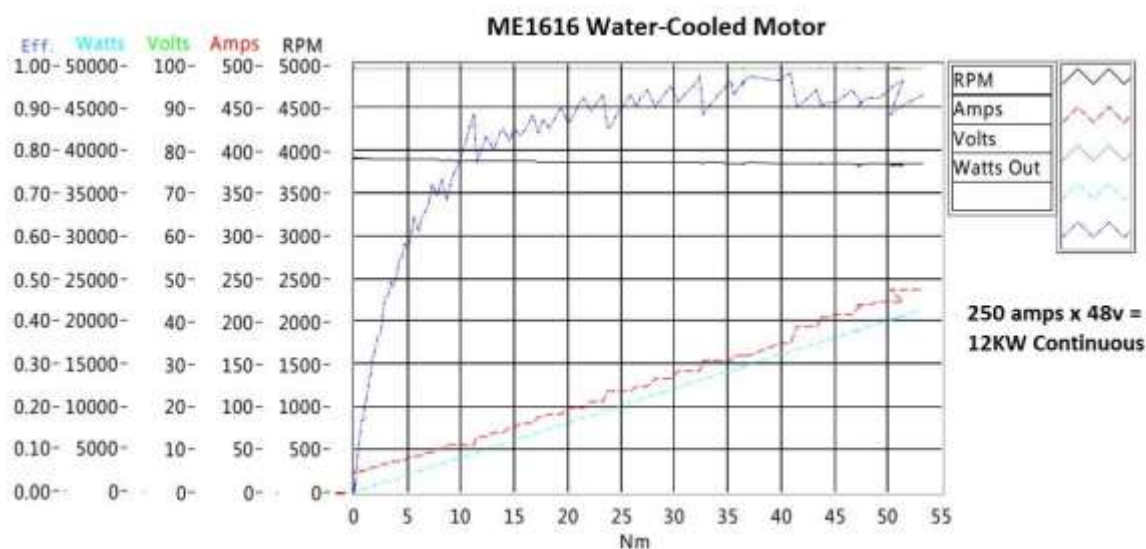
Firma Motenergy, která sídlí v americkém Hartfordu, se zabývá desingem, importem a exportem elektromotorů vyráběných v Číně. Elektromotor ME1616, jenž je na Obr. 8, je synchronní motor s permanentními magnety. [4]



Obr. 8 Elektromotor ME1616.[4]

2.4.1 Technická specifikace

Tento elektromotor má udávaný pracovní rozsah napětí 48V až 120V. Je to obdoba elektromotoru ME1507, ze kterého je použit stator i rotor, ale využívá vodní chlazení. Výrobce udávaný výkon je 12kW při napětí 48V a konstantním proudu 250A. Disponuje také efektivitou přes 92%. Jeho maximální otáčky jsou 6000 ot/min a stupeň krytí je IP67, což znamená, že motor je možno ponořit do vody až do hloubky 1 metru. [4]



Graf 5Výkonnostní křivky motoru ME1616. [4]

2.4.2 Zhodnocení motoru Motenergy ME1616

Motor firmy Motenergy ME1616 má optimální výkon při napětí používané na E-Buggy. Disponuje i dostatečným stupněm krytí pro náročnější užití v terénu, se kterým souvisí i fakt, že je chlazen kapalinou. Jeho délka přesahuje současně používaný motor jen o 3cm. Avšak provozní napětí je zde uvedeno opět od 48V, což je pro naši aplikaci nevhodné.

Tab. 4 Souhrn výkonových parametrů ME1616.

Výkon	12 kW
Točivý moment	55 Nm
Účinnost	>92%
Pracovní napětí	48-120V
Konstantní proud	250 A
Špičkový proud (doba)	550 A (60s)
Maximální otáčky	6000 ot/min

2.5 Elektromotor Motenergy ME1304

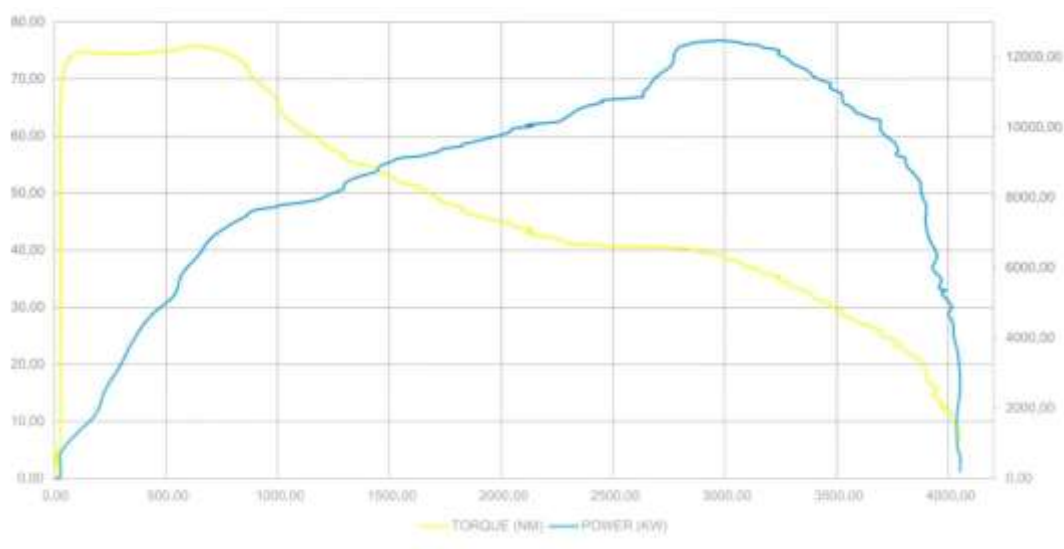
Tento motor pochází od stejné firmy jako motor předchozí, tedy Motenergy. Tento motor vychází ze svého předchůdce ME1114., To by mělo částečně zajistit, že jsou případné neduhy z předchozí generace vyřešeny. Elektromotor na Obr. 9 je synchronní motor s permanentními magnety. [5]



Obr. 9 Elektromotor Motenergy ME1304.[5]

2.5.1 Technická specifikace

Elektromotor s tichým chodem a efektivitou přes 90%. Využívá kapalinové chlazení statoru, a s tím související plně uzavřený obal. Pracovní rozsah napětí je od 24V do 72V, kontinuální proudová zátěž je 200A, avšak motor lze přetížit až na 450A po dobu 120 sekund. Dosahuje výkonu 13,5kW a maximální točivý moment je 75Nm, přičemž maximální otáčky jsou 5000 ot/min. Doporučený průtok chladicí kapaliny je 10l/min při maximálním tlaku 1,5bar.[7]



Graf 6 Výkonnostní graf motoru ME1304. [7]

2.5.2 Zhodnocení motoru Motenergy ME1304

Elektromotor ME1304 má vyhovující výkonové parametry, dostatečný stupeň ochrany a je chlazený kapalinou. S přihlédnutím na rozměry, které jsou velmi podobné současnému motoru, byl tento elektromotor vybrán jako vhodná alternativa pro projekt E-Buggy. V následujících kapitolách bude popsán vybraný měnič a návrh chladicí soustavy elektromotorů.

Tab. 5 Souhrn výkonových parametrů ME1304.

Výkon	13,5 kW
Točivý moment	75 Nm
Účinnost	>90%
Pracovní napětí	24-72V
Konstantní proud	200 A
Špičkový proud (doba)	450 A (120s)
Maximální otáčky	5000 ot/min

2.5.3 Měnič Sevcon gen4 size 4

Společnost Sevcon sídlí v anglickém městě Gateshead, a je jedním ze světových lídrů v oblasti výroby a technických řešení elektromobility.



Obr. 10 Měnič Sevcon gen4 size 4. [8]

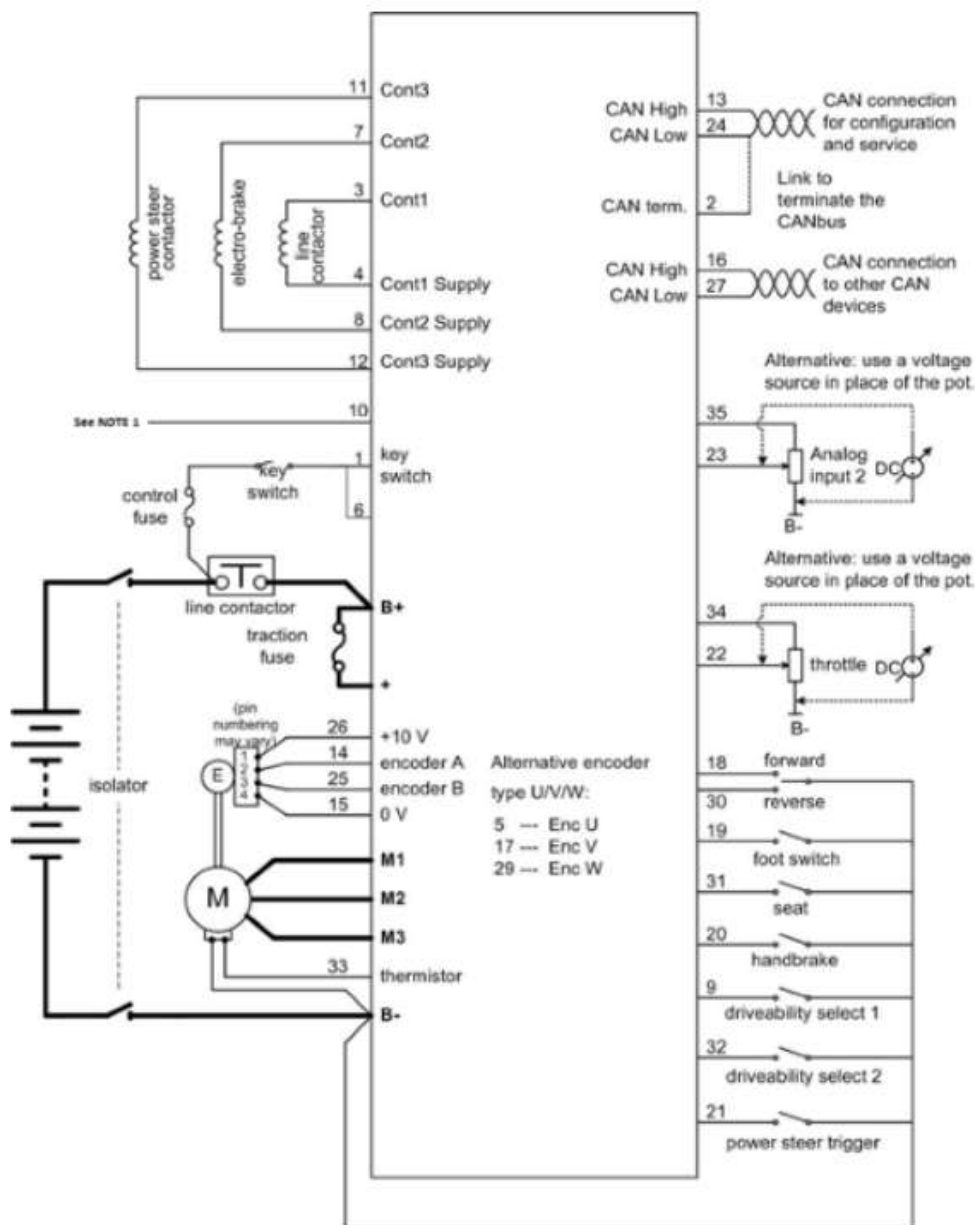
Tento měnič byl vybrán pro řízení elektromotoru ME1304. Jeho pracovní napětí je 25V-58V což vyhovuje pro napětí na bateriovém boxu E-Buggy. Byl navrhnut pro elektromotory s konstantním proudem do 180A a špičkovým proudem až 450A-po dobu 2 minut. Disponuje 8 digitálními vstupy a 2 analogovými vstupy a analogovým vstupem pro měření teploty. Samotný měnič má provozní teplotu od -30C° do +25 C°, přičemž maximální teplota měniče je 80C° od které začíná redukce proudu. Zároveň zvládá i reverzaci směru otáčení, což je při naší aplikaci žádané. [8]

Tab. 6 Výkonové parametry Sevcon gen4 size 4.

Pracovní napětí	25V – 58V
Stupeň krytí	IP 66
Konstantní proud	180 A
Maximální proud	450A (2 min)
Provozní teplota	-30 C° - 25 C°
Maximální teplota měniče	80 C°

2.5.4 Schéma zapojení Sevcon gen 4 size 4.

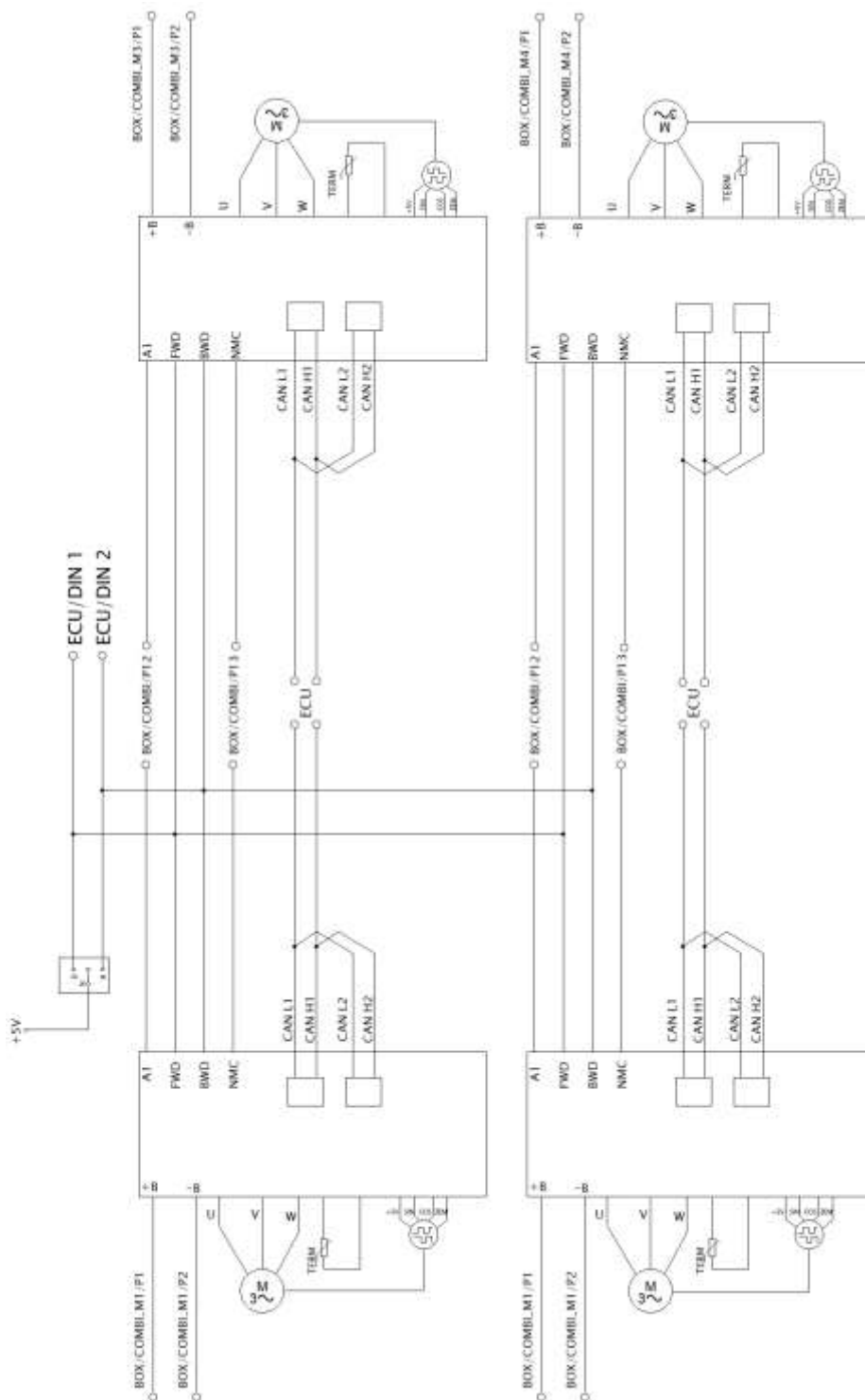
Následující schéma popisuje možné zapojení pro PMSM motor. Toto schéma je však pouze orientační a je převzato z datasheetu přímo od výrobce. Většina prvků však nebude využita, jelikož bude snahou s frekvenčním měničem komunikovat po CAN sběrnici. Výsledné schéma zapojení bude tedy obsahovat pouze nezbytně nutné prvky pro CAN řízení.



Obr. 11 Zapojení měniče na PMSM motor. [8]

2.5.5 Schéma zapojení Sevcon gen4 size 4 v E-Buggy.

Schéma na Obr. 12 zobrazuje reálné zapojení v E-Buggy. Je na něm vyobrazeno zapojení jednotlivých měničů pro všechny 4 motory, dále také zapojení termistoru pro měření teploty elektromotoru. Rotačního snímače-enkoderu na zjištění aktuálních otáček elektromotoru, připojení na bateriový box a ECU.



Obr. 12 Schéma reálného zapojení v E-Buggy.

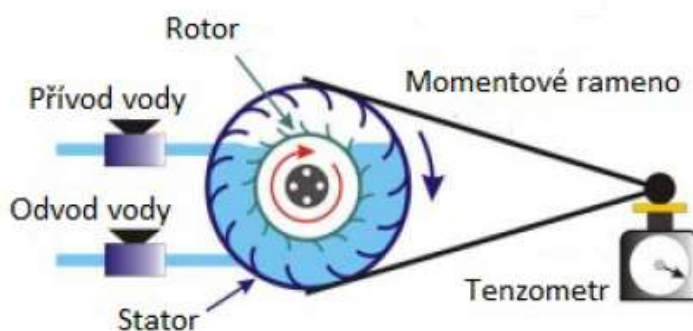
3. Měření výkonových parametrů

Parametry jako výkon a točivý moment jsou nejsledovanějším parametrem u motorů používaných pro pohon automobilů, lodí aj. K měření těchto veličin nám slouží motorové brzdy a válcové zkušebny. Pro naši konkrétní aplikaci je vhodné k měření výkonových parametrů použít motorovou brzdou, vzhledem k faktu, že elektromotor ještě není zabudován ve vozidle.

Výkon se zjišťuje pomocí měření točivého momentu (viz. Obr. 13) a následného dopočtu výkonu dle vztahu:

$$P = M_k \cdot \omega = M_k \cdot 2\pi n$$

Kde M představuje točivý moment [Nm], ω značí úhlovou rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] a n jsou otáčky [s^{-1}]. [9]



Obr. 13 Schéma měření točivého momentu na hydrodynamické brzdě. [9]

3.1 Motorová brzda Superflow SP-902

Motorová brzda Superflow SP-902 využívá k absorbování energie, vyvinuté hnací hřídelí, odstředivé vodní čerpadlo. Měření krouticího momentu spočívá v pevném spojení hřídele brzdy a hřídele měřeného motoru. Jelikož jsou motory vyráběny s rozdílnou výstupní hřídelí, je potřeba navrhnout a vyrobit vhodné mechanické spojení s motorovou brzdou. Přívodem vody do absorberu, kde polovina vybraní lopatek rotoru je ve tvaru toroidu a druhá polovina je ve statoru, dochází k realizování brzdného účinku.

3.2 Spojení motorové brzdy a elektromotoru ME1304

Kvůli testování a měření výkonových parametrů motoru na motorové brzdě na fakultě FMT, bylo potřeba výroby části příruby, která bude spojovat hřídel motoru a motorovou brzdu. Byla použita univerzální příruba s lamelovou spojkou a oddělitelná přední část. Přední část příruby vidíme na Obr. 14, kde přenos krouticího momentu je zajištěn tvarovým stykem pomocí pera. Spojení lamelové spojky a přední části příruby je pomocí 8 šroubů M5x40. Tato příruba je vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 7075 T651. Tato slitina má pevnost v tahu od 460-540 MPa. Hmotnost této součásti je přibližně 140 gramů. Přesné rozměry součásti jsou v dílenském výkrese v příloze č. 1.



Obr. 14 Příruba elektromotor-motorová brzda.

Kontrola součásti na namáhání krutem:

Jako první se určí mez kluzu:

$$Re = 460 - 540 \text{ MPa} \rightarrow \text{volím } 460 \text{ MPa}$$

Z meze kluzu a voleného součinitele bezpečnosti je vypočteno maximální dovolené napětí. Aby tato součást vyhověla, je potřeba, aby napětí v součásti bylo menší nebo rovno dovolenému napětí. Součinitel bezpečnosti se volí podle nebezpečnosti stroje a taky neznalosti vedlejších vlivů ve výpočtu. Obvyklá hodnota tohoto součinitele nabývá hodnot 1,5 – 5.

$$\sigma_{Dt} = \frac{Re}{k} \rightarrow k - \text{součinitel bezpečnosti} - \text{volím } k = 2$$

$$\sigma_{Dt} = 230 \text{ Mpa}$$

Dalším krokem je výpočet podmínky napětí v krutu. To se vypočítá jako podíl krouticího momentu a průřezového momentu v krutu, který musí být menší než maximální dovolené smykové napětí. Z této podmínky určíme, zdali součást vyhoví, nebo je potřeba ji dimenzovat.

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_{Dk} \quad \text{kde} \quad \tau_k - \text{napětí v krutu}$$

M_k – krouticí moment

W_k – průřezový modul v krutu

τ_{Dk} je přibližně $0,5 \cdot \sigma_{Dt} \rightarrow \tau_{Dk} = 115 \text{ MPa}$

$$W_k = \frac{J_p}{\frac{D}{2}} = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 \cdot d^4}{D} = 7\,048 \text{ mm}^3$$

$$\tau_k = 10,64 \text{ MPa}$$

$\tau_{Dk} > \tau_k$ Napětí v krutu vyšlo menší než maximální dovolené napětí v krutu a navrhnutá součást vyhoví.

Dále je potřeba součást zkontrolovat na otláčení pera v náboji a na stříh pera. K tomu je potřeba určit sílu působící na pero, a vypočítat minimální délku pera.

1. Výpočet působící síly na pero:

$$F = \frac{M_k}{\frac{d}{2}} = \frac{2 \cdot M_k}{d}$$

$$F = \frac{2 \cdot 75000}{22,23} = 6747,6 \text{ N}$$

2. Výpočet minimální délky pera:

$$p_{Dov} = 80 \div 120 \rightarrow \text{volím } 95 \text{ Mpa, dle strojnických tabulek [19]}$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{t_1 \cdot l} \leq p_{Dov} \rightarrow l = \frac{F}{t_1 \cdot p_{Dov}}$$

$$l = \frac{6747,6}{2,35 \cdot 95} = 30,22 \rightarrow \text{voleno dle ČSN 02 2562} \gg 36 \text{ mm}$$

3. Kontrola pera na otláčení v náboji:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{t_1 \cdot l}$$

$$p = \frac{6747,6}{2,35 \cdot 36} = 79,8 \text{ Mpa}$$

$$p \leq p_{Dov} \rightarrow \text{dle splnění podmínky vyhoví na otláčení pera v náboji}$$

4. Kontrola pera na stříh:

$$\tau_s = \frac{F}{S} = \frac{F}{b \cdot l} \leq \tau_{DovS}$$

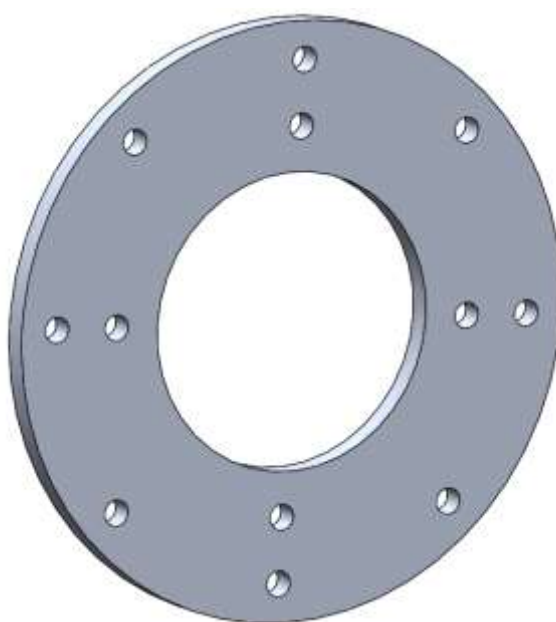
$$\tau_s = \frac{6747,6}{5 \cdot 36} = 37,5 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{DovS} = 75 \div 105 \rightarrow \text{volím } 75 \text{ MPa, dle strojnických tabulek [19]}$$

$$\tau_s \leq \tau_{DovS} \rightarrow \text{dle splnění podmínky vyhoví na stříh pera}$$

3.3 Uchycení motoru pro testování na motorové brzdě

Pro uchycení elektromotoru bude využit univerzální motorový stojan. K tomuto stojanu byl navržen mezikus tak, aby byla osa elektromotoru v ose s hřídelí motorové brzdy. Tento mezikus je vyroben z hliníku, aby byla zajištěna snadná manipulace, a vzhledem k váze motoru je to vyhovující. Mezikus k uchycení motoru je přichycen k původnímu držáku osmi šroubů M10x40. Samotný elektromotor je k tomuto mezikusu připevněn pomocí čtyř šroubů v palcovém rozměru 3/8. Tato součást bude také vyrobena ze slitiny hliníku EN AW 7075 T651, která je dostupná na fakultě materiálově technologické. Přesné rozměry součásti jsou v dílenském výkrese v příloze č. 2.



Obr. 15 Příruba pro uchycení k motorovému stojanu.

1. Kontrola šroubů na stříh:

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau_{DovS}$$

$$\tau_s = \frac{34,4}{\pi \cdot 4,5^2} \cong 0,6 \text{ MPa}$$

$$\tau_{DovS} = 70 \div 105 \rightarrow \text{volím } 75 \text{ MPa, dle strojnických tabulek [19]}$$

$$\tau_s \leq \tau_{DovS} \rightarrow \text{dle splnění podmínky šrouby vyhoví na namáhání stříhem}$$

4. Chlazení

Následující kapitola se bude zabývat různými návrhy na řešení chlazení elektromotoru ME1304. V případě E-Buggy se nejedná jen o účinné chlazení, ale taky o zachování co nejnižší hmotnosti, aby se zachovala mobilita a obratnost. Chlazení pomocí kapaliny je účinnější než chlazení vzduchem, jelikož kapalina má mnohem větší tepelnou kapacitu než vzduch.

Chlazení kapalinou lze rozdělit do 2 skupin [10]:

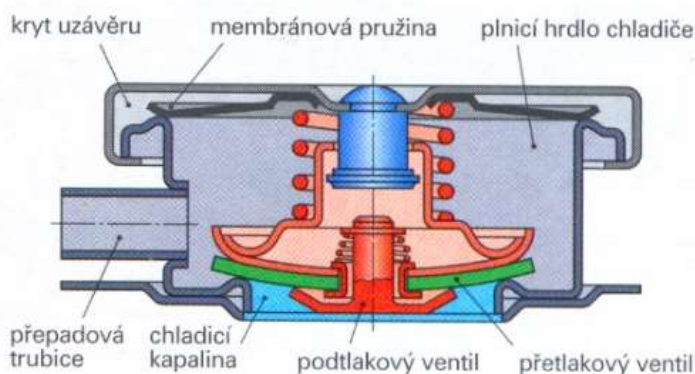
- Samočinné - termosifonové.
- S nuceným oběhem chladicí kapaliny.

4.1 Návrh chlazení pomocí 3 okruhů.

První způsob jakým je možno chladit elektromotory, v E-Buggy je rozdělit chladicí okruh na 3 samostatné okruhy. První okruh chlazení by zahrnoval elektromotory přední nápravy a u zadní nápravy by měl každý elektromotor svůj okruh chlazení. Pro přední nápravu by byl využit systém s nuceným oběhem chladicí kapaliny a u zadní nápravy potom samočinný chladicí okruh pro každý motor.

4.1.1 Chlazení motorů přední nápravy.

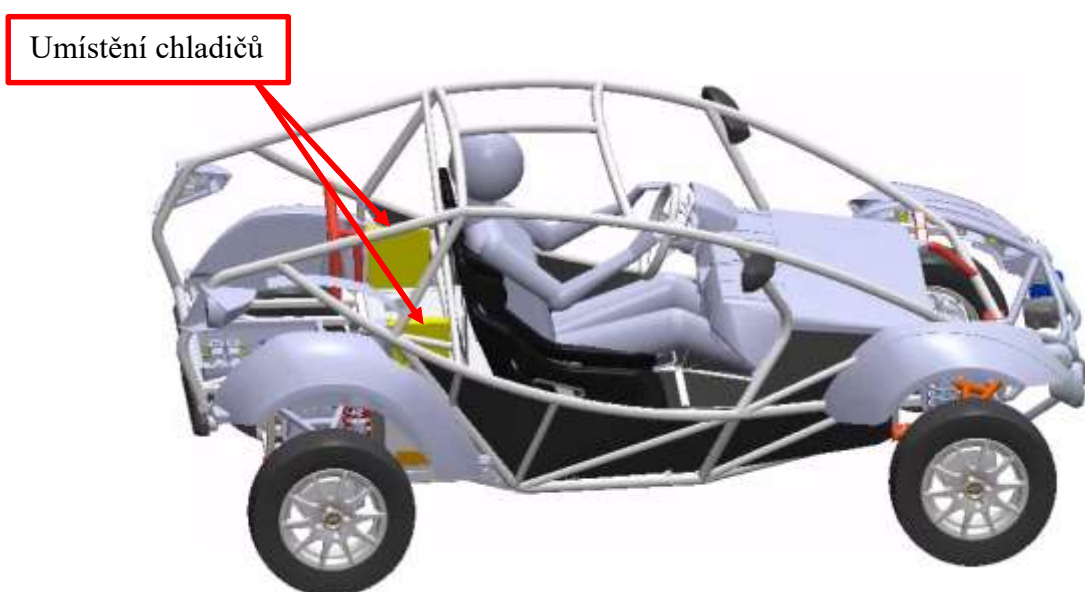
Chlazení motorů přední nápravy by zahrnovalo okruh, ve kterém by bylo pouze jedno čerpadlo pro oba motory. Toto čerpadlo by čerpalo chladicí kapalinu z obou motorů přední nápravy do chladiče a následně zpět do motorů. Součástí tohoto okruhu by byla také expanzní nádoba sloužící na vyrovnání přtlaku nebo podtlaku v chladicím okruhu. U tohoto způsobu chlazení je nutno použít chladič s víčkem, vybaveným přetlakovým a podtlakovým ventilem.



Obr. 16 Víčko s přetlakovým a podtlakovým ventilem. [10]

4.1.2 Chlazení motorů zadní nápravy.

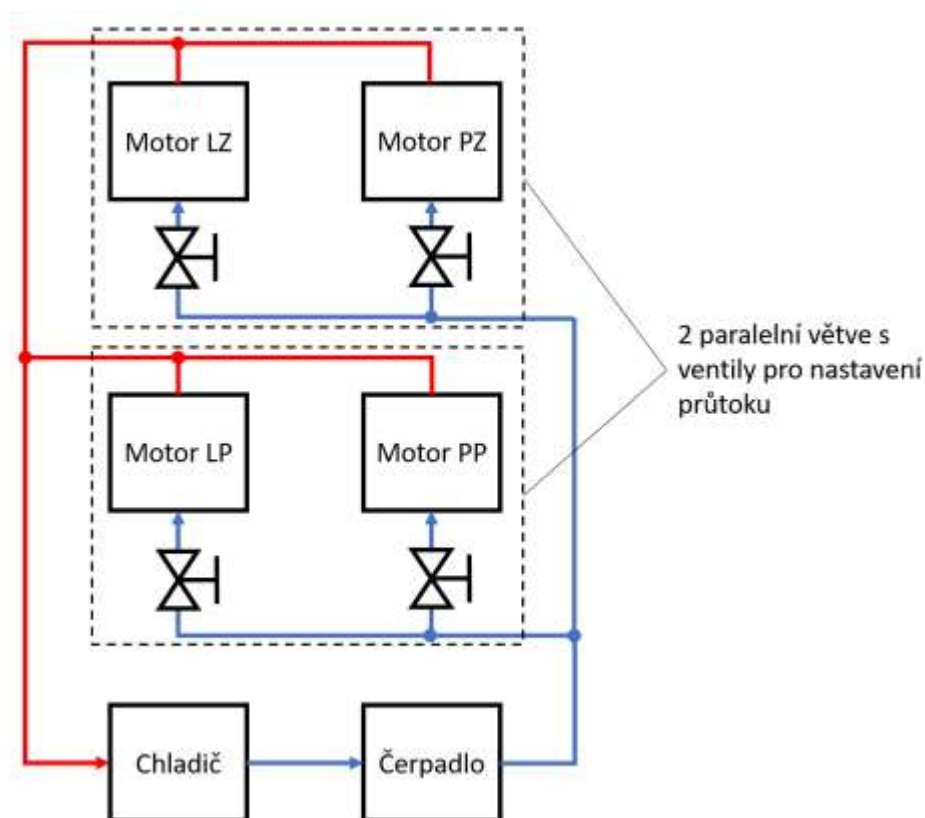
Při chlazení motorů zadní nápravy je možné využít samočinného chlazení kapalinou. Tento typ chlazení probíhá na základě změny hustoty chladicí kapaliny, která se mění se změnou teploty kapaliny. Pro správnou funkci tohoto typu chladicího okruhu je nutné umístit chladič výše než je samotný motor a chladicí systém musí být celý zaplněn chladicí kapalinou. Chladič motorů zadní nápravy by tak mohl být umístěn, aby splňoval kritérium výšky od motoru, do prostoru kde je nyní prostor na nasávání vzduchu pro chlazení původních motorů LEM200-D135. Je taky nezbytné, aby tento chladič byl osazen ventilátorem, který by zajišťoval dostatečný průchod vzduchu, jelikož by tento chladič byl umístěn souběžně se směrem jízdy E-Buggy.



Obr. 17 Zobrazení možného umístění chladičů motorů zadní nápravy.

4.2 Návrh chlazení pomocí 1 okruhu.

Chlazení s využitím jednoho okruhu by zahrnovalo pouze jedno čerpadlo pro všechny čtyři elektromotory. Dále by bylo možné soustavu rozdělit na dvě paralelní větve. V jedné by byly chlazeny přední motory a ve druhé zadní. Výhodou tohoto řešení je to, že se ke každému motoru dostane studená voda přímo z chladiče. Pro zajištění stejného průtoku chladicí kapaliny všemi motory by bylo možné umístit před každý motor škrtecí ventil. Tyto ventily by mohly být buď manuální, nebo elektronicky ovládané. V rámci elektronického řešení by však musely být ještě do okruhu doplněny průtokoměry.



Obr. 18 Schéma chlazení 4 elektromotorů pomocí jednoho okruhu.

4.3 Chladicí médium

Chladicí kapalina slouží k odvodu tepla ven z motoru. U elektromotoru ME1304 doporučuje výrobce použití chladicí kapaliny směs vody a glykolu a to v 50% koncentraci. Pro potřeby chlazení E-Buggy byla vybrána chladicí kapalina s označením G12+ podle normy VW TL774. Tato kapalina má fialovou/růžovou barvu, její základní nemrznoucí složka je Ethan-1, 2-diol a doporučená lhůta výměny 5 let. Měrná tepelná kapacita při 90°C je 3784,74 J.kg⁻¹.K⁻¹ a teplota varu je 110°C. [18]

4.4 Chladič

Chladič slouží pro odebrání tepla z chladicího média a jeho předávání proudícímu vzduchu. Jeho výkon je možné zvýšit především zvýšením činné plochy chladiče. Chladič se skládá ze vstupní komory, chladicí mříže, a komory výstupní. Ohřátá chladicí kapalina je odváděna z výstupu motoru do komory vstupní na chladiči, kde dále putuje na mříž chladiče a rozděluje se do chladicích kanálků. Skrze stěny těchto kanálků je vedením předáno na vlnovce, které spojují chladicí kanálky a zajišťují zvýšení chladicí plochy. Odtud je poté teplo předáváno vedením proudícímu vzduchu. Poté z komory výstupní proudí ochlazené médium zpět do motoru.

4.5 Návrh velikosti činné plochy chladiče

Ve výpočtech velikosti chladiče se nejdříve uvažuje o velikosti chladiče pro nejvyšší účinnost elektromotoru ME1304, což je výrobcem udávaná účinnost přes 90% a zbylých 10% je předáno chladicí kapalině, jako teplo, které je potřeba uchladiť. Dále je zde počítán případ pomalé jízdy do kopce, s malou stálou rychlostí a nižší účinností. Výpočet je aplikován pro teplotu vzduchu 25°C což je přibližně 4-5°C nad průměrnou denní teplotou v ČR v letních dnech. Poté je zde zahrnut i výpočet pro extrémní teplotu a to 35°C.

1. Teplo předané chladicí kapalině – při nejvyšší účinnosti:

V prvním kroku se vypočítá maximální teplo předané chladicí kapalině. Tento výpočet bere v úvahu maximální výkon, který je brán z tabulek poskytnutých výrobcem.

$$Q_{G12+} = P_{elmot} \cdot q \cdot 4$$

$$Q_{G12+} = 5,4 \text{ kW}$$

kde $P_{elmot} [\text{kW}]$

maximální výkon elektromotoru

$q [-]$

součinitel účinnosti (volím 0,1, což odpovídá 90% účinnosti elektromotoru)

2. Hustota vzduchu:

$$\rho_{vzd} = \frac{P_{atm}}{r_{vzd} \cdot T_{vzd}}$$

$$\rho_{vzd} = 1,184 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \text{pro teplotu } 25^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{vzd} = 1,145 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \text{pro teplotu } 35^{\circ}\text{C}$$

kde $P_{atm} [\text{Pa}]$

atmosférický tlak

$r_{vzd} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ hmotnostní plynová konstanta pro vzduch

$T_{vzd} [\text{K}]$ teplota vzduchu (273,15+25°C/ 35°C)

3. Maximální teplotní změna (chladicí kapalina – vzduch):

$$\Delta T_{max} = T_{G12+,max} - T_{vzd}$$

$$\Delta T_{max} = 65 \text{ K} \quad \text{při teplotě } 25^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{max} = 55 \text{ K} \quad \text{při teplotě } 35^\circ\text{C}$$

kde $T_{G12+,max}$ [K] maximální teplota chladicí kapaliny
(273,15+90°C)

4. Výpočet činné plochy chladiče:

$$S_{chl} = \frac{Q_{vzd,max}}{c_{p,vzd} \cdot \Delta T_{max} \cdot \rho_{vzd} \cdot v_{vzd}}$$

$$S_{chl} = 0,00462 \text{ m}^2 \quad \text{pro teplotu } 25^\circ\text{C}$$

$$S_{chl} = 0,00563 \text{ m}^2 \quad \text{pro teplotu } 35^\circ\text{C}$$

kde $Q_{vzd,max}$ [kW] maximální možné teplo předané proudícímu vzduchu

$c_{p,vzd}$ [J · kg⁻¹ · K⁻¹] měrná tepelná kapacita vzduchu, při konstantním tlaku (při teplotě 25°C, 1013 J·kg⁻¹·K⁻¹)

v_{vzd} [m · s⁻¹] rychlost vzduchu (voleno dle oblasti, kde se nachází účinnost 90%, $v_{vzd} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Z výpočtu vidíme, že plocha pro chladiče pro uchazení 4 elektromotorů ME1304 při účinnosti 90% a rychlosti 15 m·s⁻¹, musí být alespoň 0,00407 m² pro teplotu 25°C a 0,00470m² pro teplotu 35°C. Což odpovídá čtverci o straně přibližně 7 cm pro teplotu 25°C a 8 cm pro teplotu 35°C.

1. Teplo předané chladicí kapalině – při jízdě do kopce:

$$Q_{G12+} = P_{elmot} \cdot q \cdot 4$$

$$Q_{G12+} = 21,6 \text{ kW}$$

kde P_{elmot} [kW]

maximální výkon elektromotoru

q [–]

součinitel účinnosti (volím 0,4, což odpovídá 60% účinnosti elektromotoru)

2. Hustota vzduchu:

$$\rho_{vzd} = \frac{P_{atm}}{r_{vzd} \cdot T_{vzd}}$$

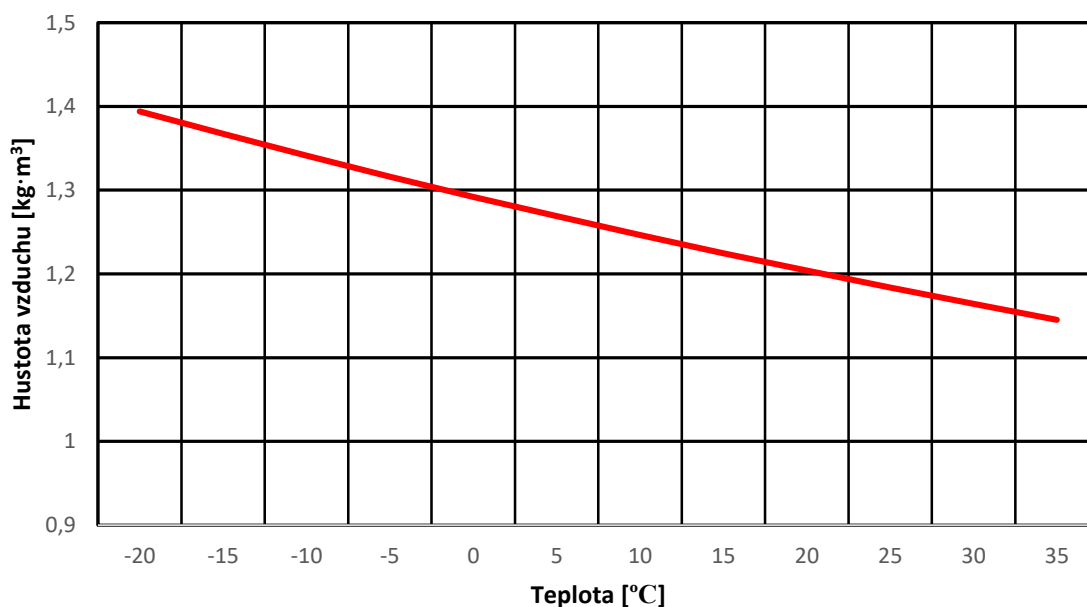
$$\rho_{vzd} = 1,184 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \text{pro } 25^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{vzd} = 1,145 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \text{pro } 35^{\circ}\text{C}$$

kde $P_{atm} [\text{Pa}]$ atmosférický tlak

$r_{vzd} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ hmotnostní plynová konstanta pro vzduch

$T_{vzd} [\text{K}]$ teplota vzduchu ($273,15 + 25^{\circ}\text{C}$)



Graf 7 Závislost hustoty vzduchu na teplotě.

3. Maximální teplotní změna (chladicí kapalina – vzduch):

$$\Delta T_{max} = T_{G12+,max} - T_{vzd}$$

$$\Delta T_{max} = 65 \text{ K} \quad \text{při teplotě } 25^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{max} = 55 \text{ K} \quad \text{při teplotě } 35^{\circ}\text{C}$$

kde $T_{G12+,max} [\text{K}]$ maximální teplota chladicí kapaliny ($273,15 + 90^{\circ}\text{C}$)

4. Výpočet činné plochy chladiče:

$$S_{chl} = \frac{Q_{vzd,max}}{c_{p,vzd} \cdot \Delta T_{max} \cdot \rho_{vzd} \cdot v_{vzd}}$$

$$S_{chl} = 0,092 \text{ m}^2 \quad \text{pro teplotu } 25^{\circ}\text{C}$$

$$S_{chl} = 0,113 \text{ m}^2 \quad \text{pro teplotu } 35^{\circ}\text{C}$$

kde $Q_{vzd,max} [kW]$	maximální možné teplo předané proudícímu vzduchu
$c_{p,vzd} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita vzduchu, při konstantním tlaku (při teplotě 25 °C, 1013 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
$v_{vzd} [m \cdot s^{-1}]$	rychlost vzduchu (voleno dle oblasti z výkonnostního grafu, kde se nachází účinnost 60%, $v_{vzd} = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Z výpočtu můžeme vidět, že činná plocha chladiče pro případ teploty okolí 35 °C by měla mít alespoň 0,113 m², což odpovídá čtverci o straně přibližně 35 cm.

5. Hmotnostní průtok vzduchu

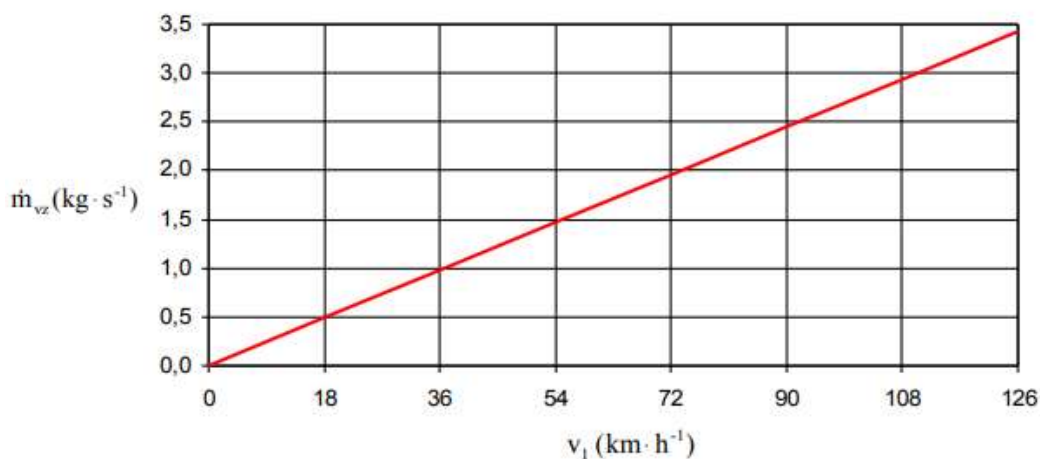
Hmotnostní průtok vzduchu udává hmotnost vzduchu, který proteče chladičem za jednotku času. Ve vypočítávaném příkladu je to pro rychlost 3 m·s⁻¹ a teplotu 25 °C a 35 °C.

$$\dot{m}_{vzduch} = \rho_{vzduchu} \cdot S_{chl} \cdot v_1$$

$$\dot{m}_{vzduch} = 1,109 \cdot 0,113 \cdot 3$$

$$\dot{m}_{vzduch} = 0,376 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{pro } 35 \text{ °C, } v_1 = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (cca } 11 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1})$$

$$\rho_{vzd} [\text{kg} \cdot \text{m}^3] \quad \text{hustota vzduchu (1,184 pro } 25 \text{ °C, 1,145 pro } 35 \text{ °C)}$$



Graf 8 Hmotnostní průtok vzduchu v závislosti na rychlosti.

6. Hmotnostní průtok chladicí kapaliny

Pro hmotnostní průtok kapaliny je počítáno s průměrem potrubí, který odpovídá vstupu a výstupu z elektromotoru ME1304, tedy 10mm s plochou $S_{potrubí} = 0,0157 \text{ m}^2$. Doporučený průtok je 10 l/min (0,6 m³/h), který je zároveň použit pro výpočty což odpovídá v daném potrubí rychlosti 2,12 m·s⁻¹.

$$\dot{m}_{chl k} = \rho_{chl k} \cdot V_p$$

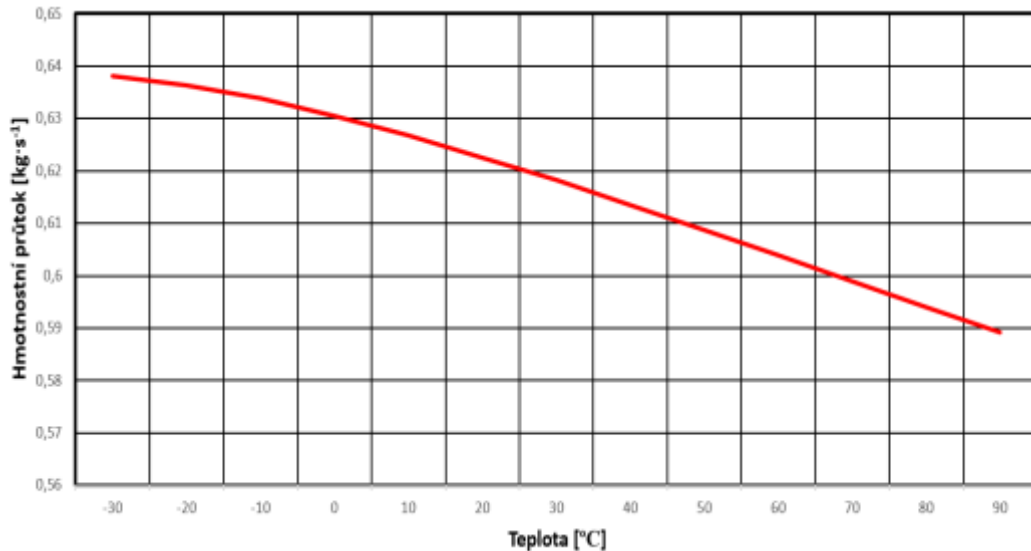
$$\dot{m}_{chl k} = 0,618 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde $\rho_{chl k}$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^3$]

je hustota chladicí kapaliny G12+, která má hustotu $1030,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ při 30°C

V_p [$\text{m}^{-3} \cdot \text{h}$]

Objemový průtok kapaliny



Graf 9 Hmotnostní průtok chladicí kapaliny v závislosti na teplotě.

7. Teplotní spád chladicí kapaliny na chladiči

$$\Delta T = \frac{Q_{G12+}}{c_{p,G12+} \cdot \dot{m}_{G12+}}$$

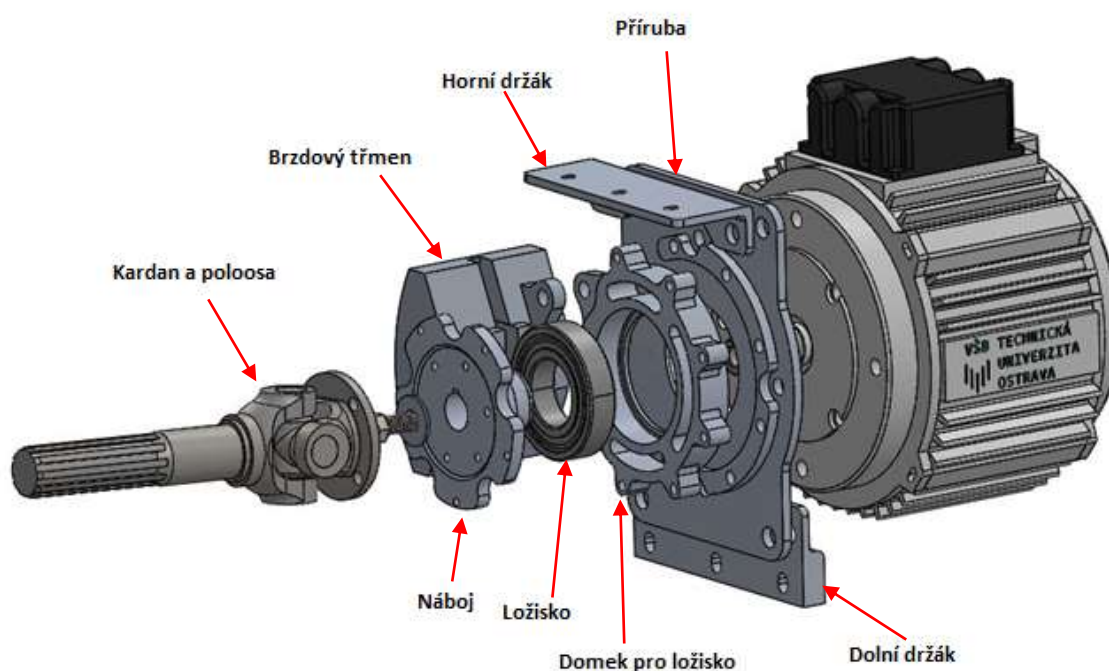
$$\Delta T = \frac{21600}{3784,74 \cdot 0,618}$$

$$\Delta T = 9,23 \text{ K}$$

Z výpočtu lze vidět, že chladič, který bude mít funkční plochu $0,0157 \text{ m}^2$, bude dostačující pro uchazení 4 elektromotorů ME1304. Tyto výpočty vycházejí z parametrů dodaných výrobcem, reálný výkon bude nižší, a výkon chladiče předimenzovaný, což lze při aplikaci upravit podle příložených výpočtů nebo je možno brát jako výkonovou rezervu. Chladič by také měl mít ventilátor, který by zajišťoval i v malých rychlostech dostatečný průtok vzduchu. Příkladem pro takový ventilátor, s dostatečným průtokem, může být od firmy SPAL s označením VA07-AP12/C-31A.

5. Návrh uložení elektromotoru ME 1304 v E-Buggy

Následující kapitola se zabývá samotným návrhem uložení elektromotoru ME1304 v prototypu E-Buggy. Jelikož jsou tyto motory větší, co se jejich šířky týká, je zapotřebí přepracovat i celé jejich uložení. Také jsou chlazeny kapalinou, a tudíž není zapotřebí, aby celý jejich skelet byl zakrytován jako u původních elektromotorů LEM 200-D135. Váhu jednotlivých dílů je možné vidět v Tab. 7.



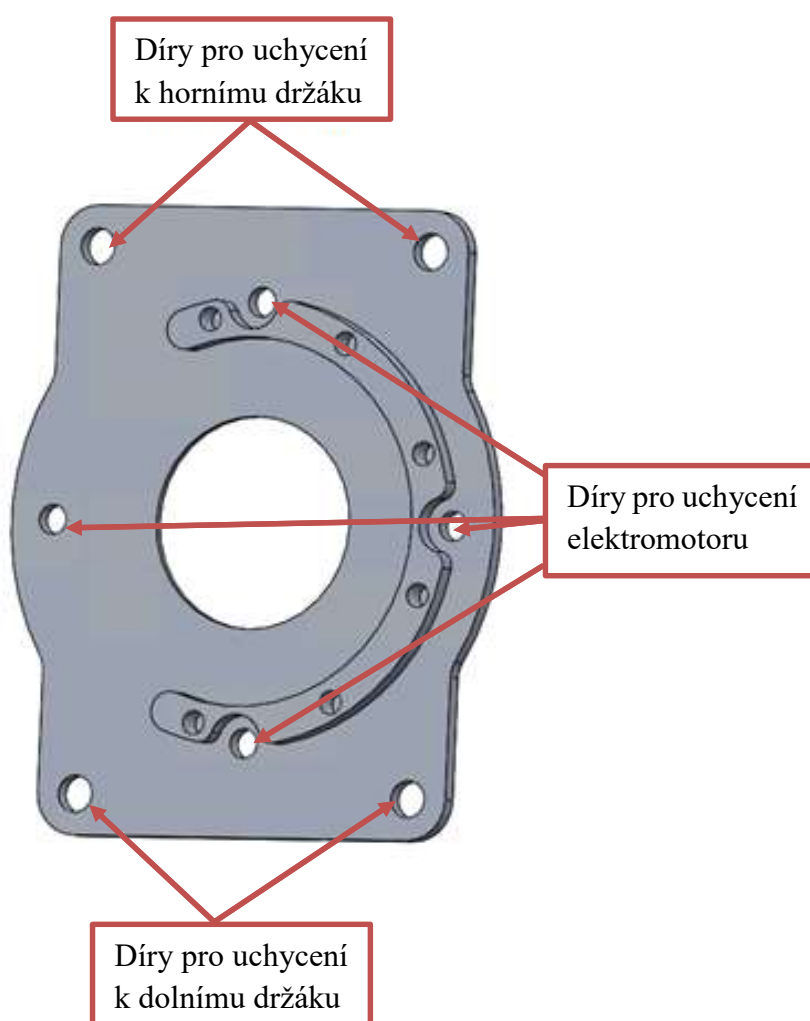
Obr. 19 Modelová sestava uložení motoru ME1304.

Tab. 7 Váhy jednotlivých komponentů uložení elektromotoru.

Součást	Hmotnost
Příruba ME1304	490g
Držák horní	150g
Držák spodní	240g
Domek pro ložisko	340g
Náboj	350g

5.1 Příruba ME1304

K samotnému uchycení elektromotoru slouží příruba, která je přichycena pomocí 4 šroubu M12 k hornímu a dolnímu držáku. Tato příruba, jenž vidíme na Obr. 20, nese v sobě taky čtveřici děr pro uchycení motoru pomocí šroubu 3/8 palce. Dále zde vidíme frézované osazení pro přichycení domku ložiska, které má v sobě 6 průchozích děr se závitem M8. Příruba bude vyfrézovaná ze slitiny hliníku EN AW 7075 T651 na katedře materiálů a technologií pro automobily. Přesné rozměry součásti jsou v dílenském výkrese v příloze č. 3. Tato příruba je horizontálně osově souměrná a tudíž ji lze použít jak pro pravou tak i pro levou stranu pro uchycení elektromotoru ME1304.



Obr. 20 Příruba pro elektromotor ME1304.

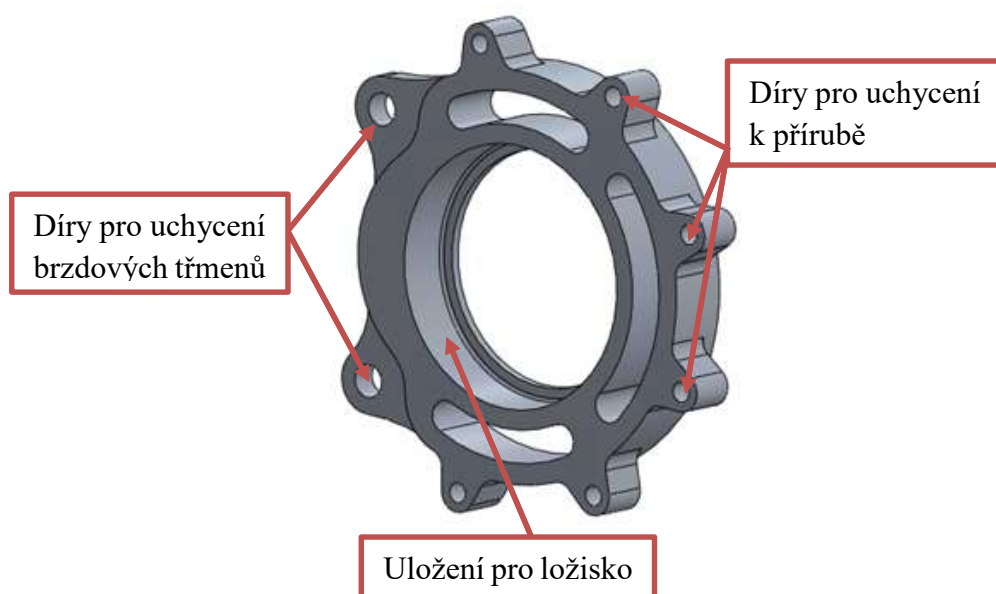
5.2 Horní a dolní držák pro přírubu

Horní a dolní držák příruby slouží k uchycení do samotného rámu E-Buggy. Tyto držáky jsou k rámu uchyceny pomocí 3 šroubů M8 a spojení s přírubou zajišťují 2 šrouby M12. Při uchycení do rámu E-Buggy je potřeba odřezat původní přivařené držáky původních motorů, a vyvrtat nové díry pro stávající držáky, protože by původní držáky zavazeli vývodu vodního chlazení elektromotoru ME1304. Tyto držáky jsou taktéž ze slitiny EN AW 7075 T651.



5.3 Domek pro ložisko

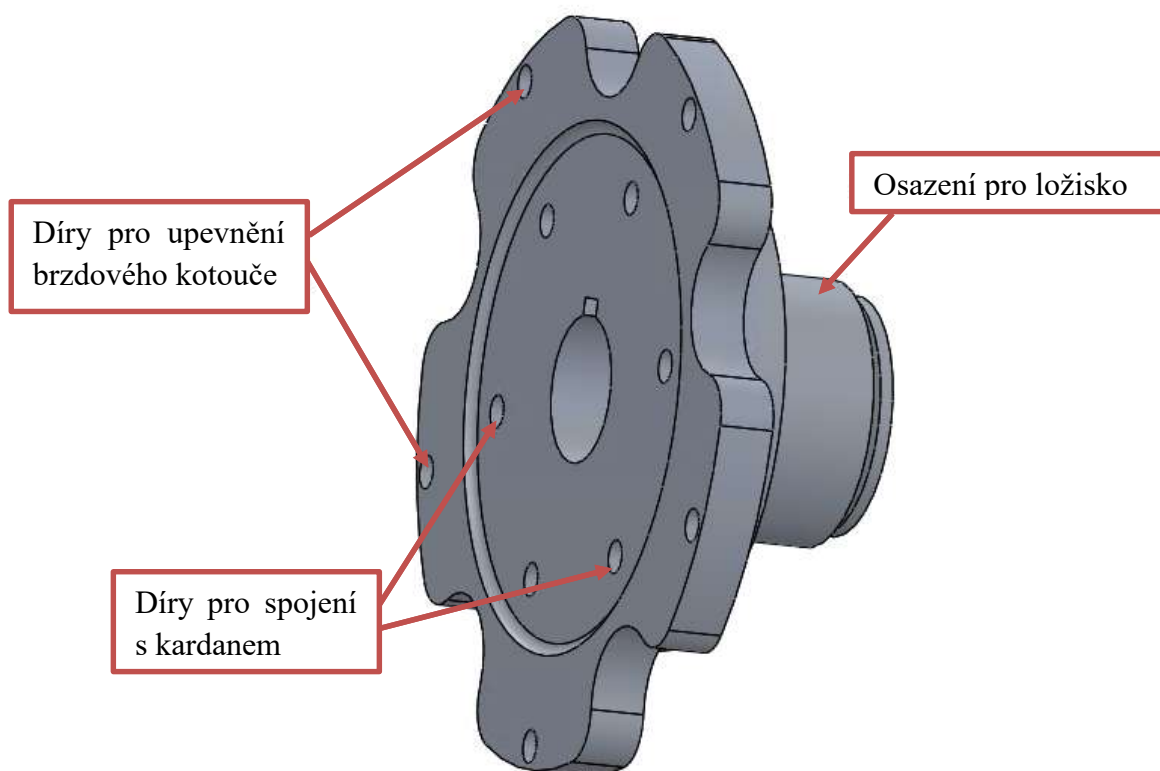
Další součástí je domek pro ložisko, který zároveň slouží i jako držák brzdového třmenu. Tento domek je uchycen pomocí šestice šroubů M8 k přírubě elektromotoru ME1304. Tento domek bude vyroben ze slitiny hliníku EN AW 7075 T651, a je částečně odlehčen obvodovými drážkami. Uchycení brzdového třmenu zajišťují dva šrouby M10. Je zde i uložení pro ložisko, které je zajištěno proti axiálnímu posunu pomocí osazení. Přesné rozměry součásti jsou v dílenském výkrese v příloze č. 7.



Obr. 22 Domek pro ložisko a držák brzdového třmenu.

5.4 Náboj-spojení elektromotoru s kardanem

Pro samotné přenesení výkonu na kolo slouží náboj, který je spojen s hřídelí elektromotoru pomocí pera, které tak převádí tvarovým stykem krouticí moment dál na kardan a kolo. Tento náboj je uložen v jednořadém kuličkovém ložisku nesoucí označení 6208-2Z, které slouží hlavně pro přenos radiální síly, ale je schopno absorbovat i axiální síly a je oboustranně zakrytováno. Proti axiálnímu posunu je zde zajištěno pomocí osazení. Taky je tu 5 děr pro šrouby M6 pro uchycení brzdového kotouče. Pro spojení s kardanem slouží 6 děr pro šrouby M8.



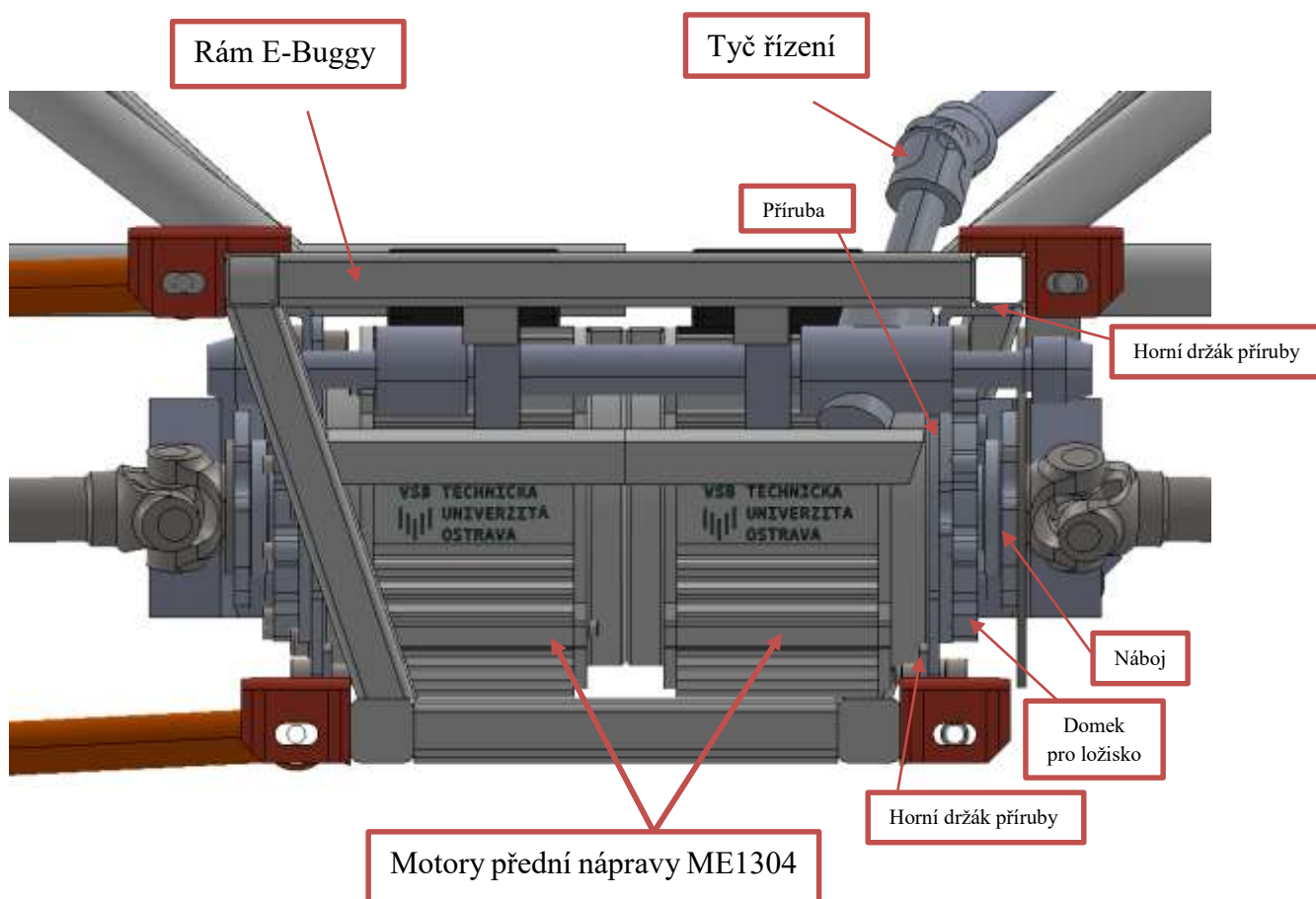
Obr. 23 Náboj pro spojení motoru s poloosou.

5.5 Uložení v modelu E-Buggy

Na Obr. 24 vidíme celou E-Buggy a v ní uloženy nové elektromotory ME1304, kde na Obr. 25 můžeme vidět detail, jak bude vypadat celé uložení elektromotorů ME1304 pro přední nápravu. Toto uložení je navrženo tak, aby nenastala kolize s tyčí řízení nebo dalšími prvky rámu. Ačkoliv to není z obrázku úplně zřetelné, mezi motory je mezera přibližně 2mm.



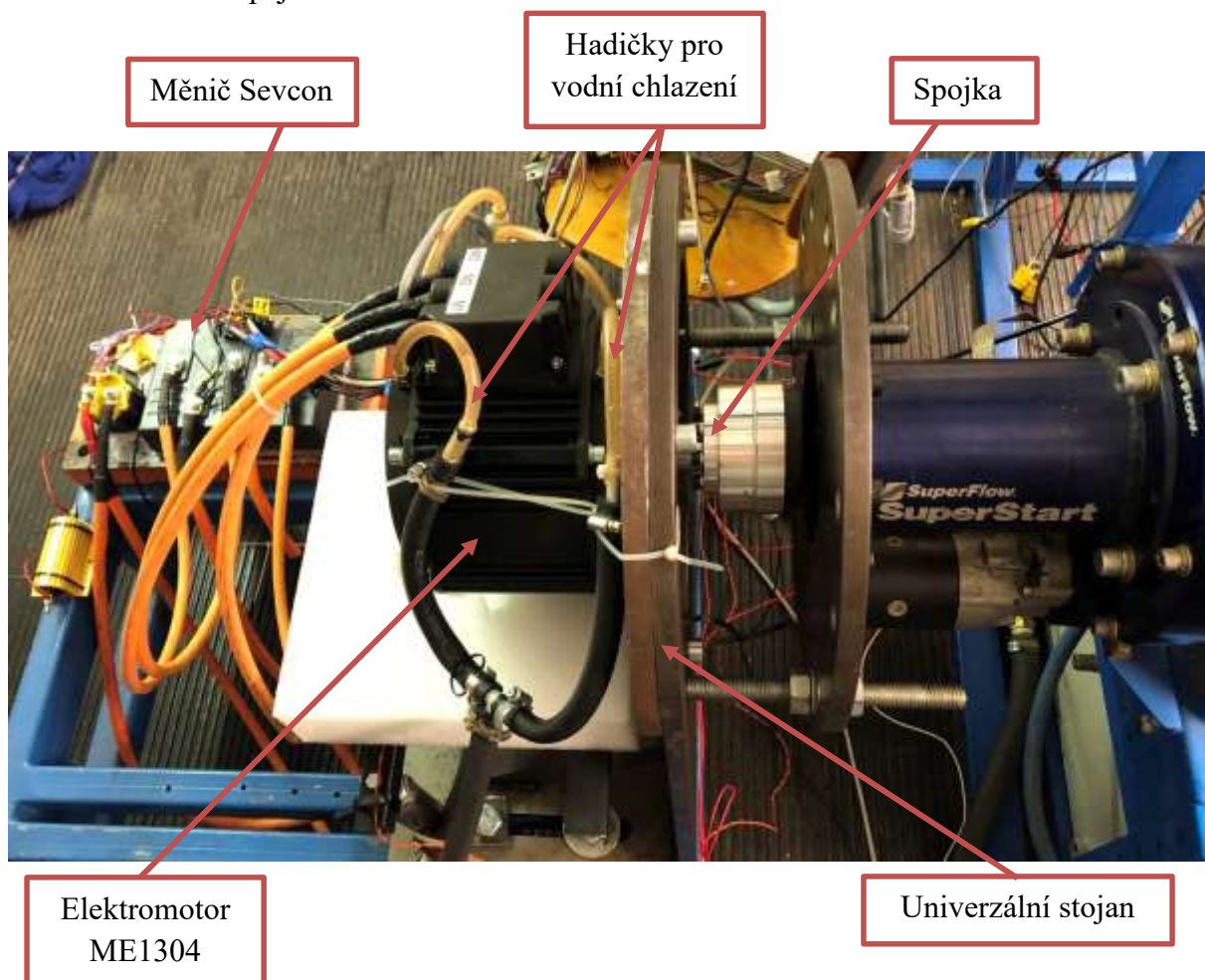
Obr. 24 Pohled na E-Buggy s uložení nových elektromotorů.



Obr. 25 Detail uložení motorů přední nápravy v modelu E-Buggy.

6. Měření parametrů na motorové brzdě

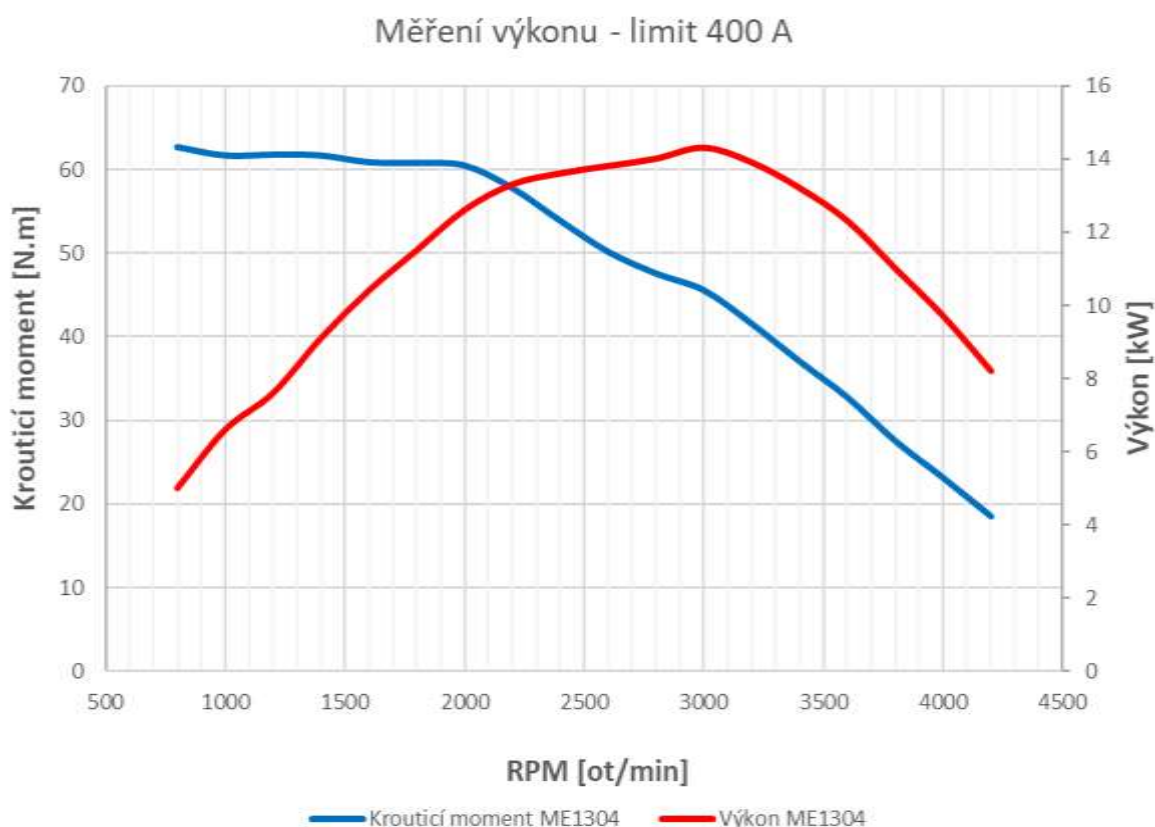
Pro měření výkonu na motorové brzdě, byla navrhnutá spojka, která slouží k spojení hřídele motoru s motorovou brzdou. Tato spojka je přichycena k motorové brzdě pomocí 8 šroubů M6 jak můžeme vidět na Obr. 26, a s motorem je spojena pomocí těsného pera 3/16 v délce 1-1/2 palce. Dále byla navržena příruba, která slouží pro uchycení motoru k motorovému stojanu., přichycena pomocí 8 šroubů M10 a zároveň uchycuje elektromotor ME1304 pomocí 4 šroubů 3/8". Je zde také přívod dvou okružového vodního chlazení obalu elektromotoru a napájení z měniče.



Obr. 26 Zapojená sestava elektromotoru k motorové brzdě.

Po připojení veškerých komponent a nastavení měniče pro daný elektromotor a bateriový box proběhlo měření výkonu. Toto měření výkonu proběhlo v manuálním režimu, jelikož motorová brzda není přizpůsobená pro automatické měření výkonu u elektromotoru.

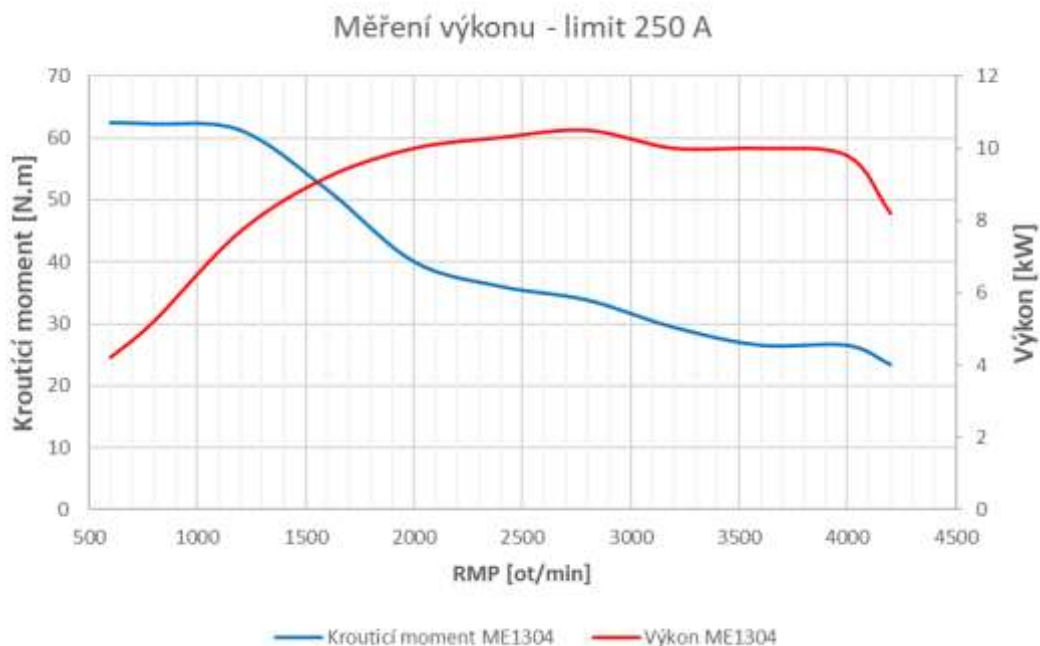
Nejprve se měřil elektromotor na maximální výkon s limitem proudu na 400A. Tato hodnota byla nastavena jako limitní přímo v softwaru frekvenčního měniče, aby nedošlo k přetížení. Tento limit byl zvolen také s ohledem na pojistku, která byla dimenzována na 425A. Průběh výkonu a točivého momentu lze vidět na Graf 10. Jde z něj vyčíst, že největšího výkonu 14,3 kW bylo dosaženo při 3000 ot/min a nejvyšší krouticí moment dosahoval 62,7 N·m při 800 ot/min. Všechna měření probíhali od 600-800 ot/min (viz Graf 10), jelikož motorová brzda není schopna změřit výkon pod 3 kW.



Graf 10 Momentové charakteristiky pro proud 400A.

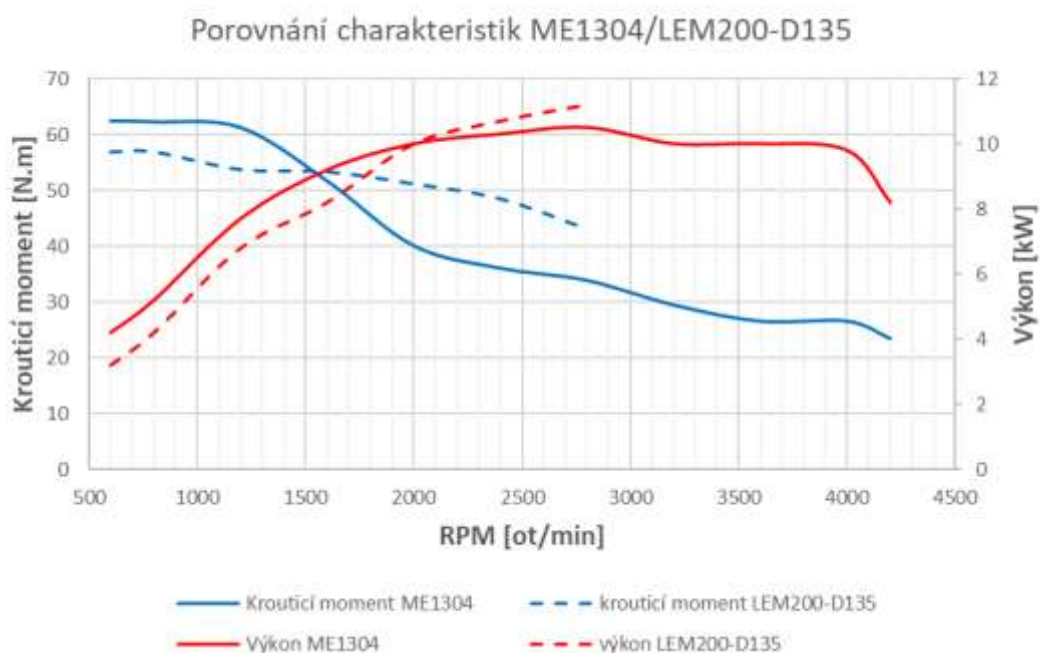
Další měření probíhalo s nastaveným limitem proudu na 250A, aby bylo možné porovnat parametry s předchozím motorem LEM200-D135. Ty byly měřeny také s limitem 250A a v rámci stávající koncepce E-Buggy jsou jištěny také 250A pojistkou. Tímto měřením bylo zjištěno, že elektromotor ME1304 dosahuje nižšího výkonu, ale zároveň disponuje vyšším

počátečním krouticím momentem. Nevyšší hodnota výkonu 10,5 kW byla naměřena v 2800ot/min.



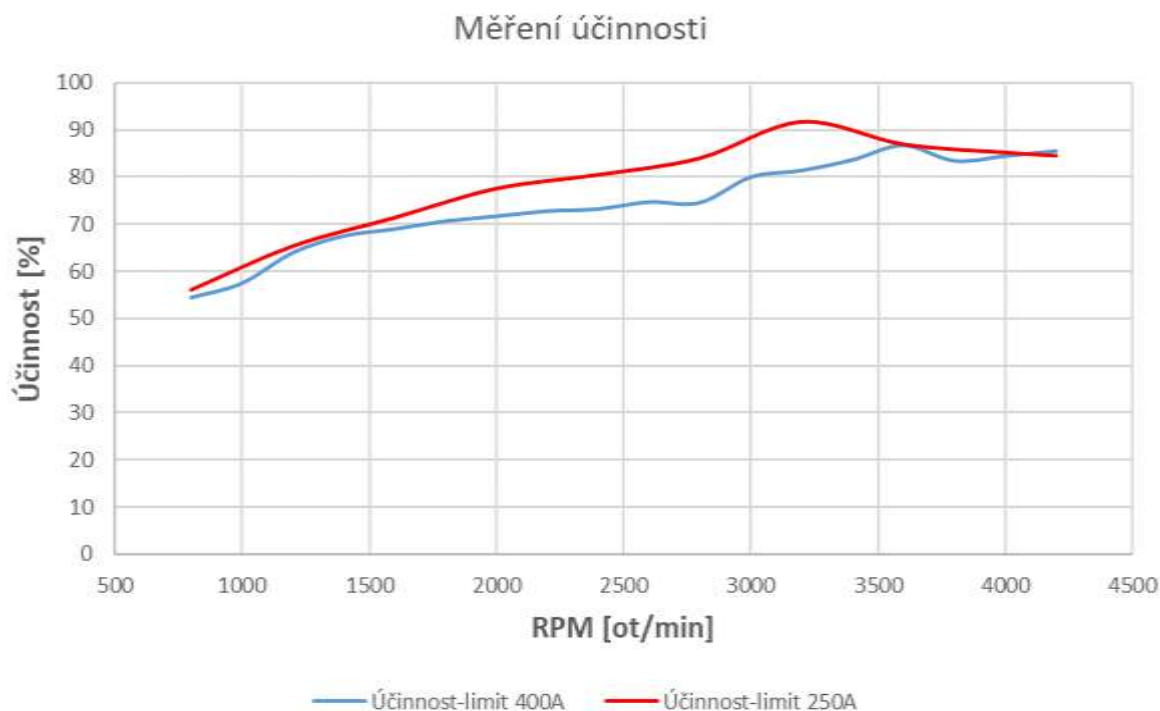
Graf 11 Momentové charakteristiky pro proud 250A.

Následující Graf 12 už znázorňuje konkrétní hodnoty výkonu pro oba elektromotory. Lze vidět, že hlavní výhodou nového elektromotoru jsou mnohem vyšší otáčky, které jsou téměř dvojnásobné. Maximální rychlost vozidla by se tedy měla zvýšit ze 45 km/h na skoro 80 km/h.



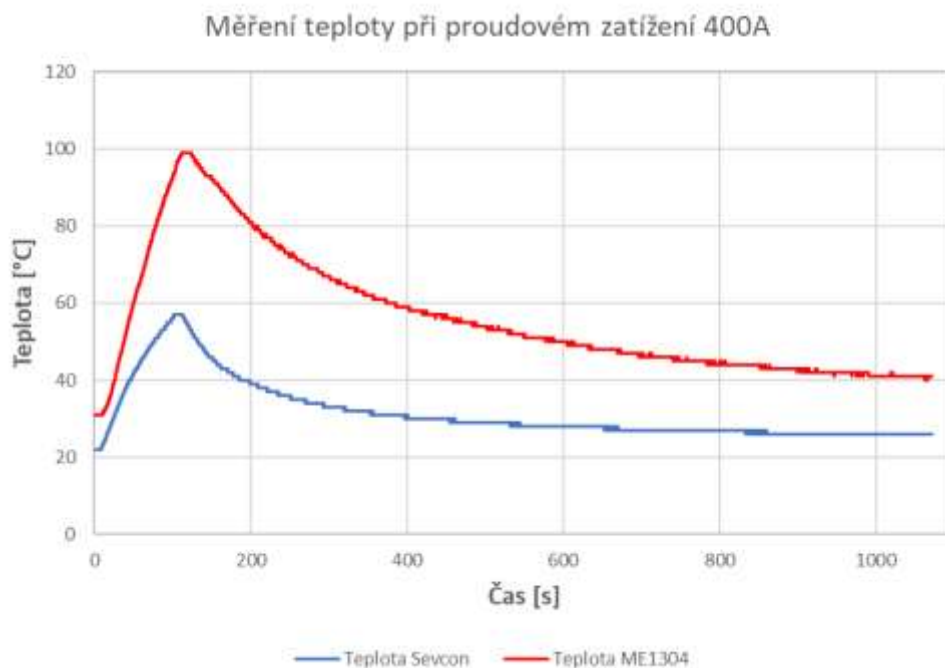
Graf 12 Porovnání charakteristik ME1304/LEM200-D135.

Účinnost elektromotoru ME1304 byla měřena přímou metodou, což znamená, že je měřen příkon motoru a výkon na hřídeli je určen z úhlové rychlosti a krouticího momentu. Touto metodou byla změřena účinnost, která dosahovala svého maxima 86,6% ve 3600 ot/min s použitím limitu 400A. Při nastavení limitu na 250A bylo dosaženo účinnosti 91,7%. Zároveň lze z Graf 13 vyčíst, že účinnost při menší proudové zátěži je vyšší.



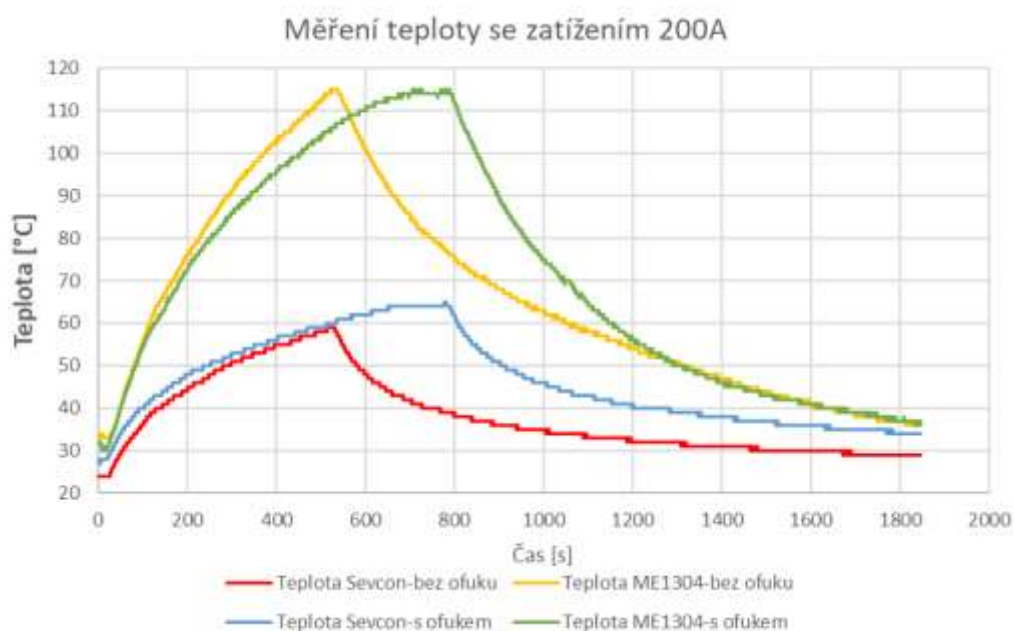
Graf 13 Měření účinnosti elektromotoru ME1304.

Dalším měřením se testovala doba, za jakou elektromotor dosáhne ustálení teploty při zatížení 400A a výkonu 14,3 kW při 2800 ot/min. Výchozí teplota motoru pro toto testování byla 31°C. Testování bylo ukončeno po 97 sekundách, kdy motor dosáhl teploty 95°C. Měření bylo ukončeno z toho důvodu, že bylo již patrné, že nedojde k ustálení teploty do kritické hodnoty 150°C. Z grafu (viz Graf 14) lze taky vidět, že teplota po ukončení testu vzrostla na hodnotu 99°C vlivem setrvačnosti. Ochlazení na teplotu 55°C proběhlo za 983 sekund.



Graf 14 Měření teploty elektromotoru ME1304 při limitu 400A.

V dalším testování ustálení teploty bylo zvoleno zatížení motoru 200A, při kterém výkon dosahoval 9,3 kW při 2800 ot/min. Tento test byl zastaven po 511 sekundách, kdy bylo dosaženo 114°C, ale i zde nebylo patrné, že by došlo k ustálení teploty do kritické hodnoty 150°C. Při tomto testu byl však chladicí okruh připojen na chladič, který nebyl ofukován. Poslední měření teploty proběhlo za stejných podmínek, ale se zapnutým ventilátorem chladiče, kdy zahřátí a ustálení na teplotě 114 °C proběhlo po 673 sekundách.



Graf 15 Měření teploty ME1304 se zatížením 200A.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit současně používané elektromotory v prototypu vozidla E-Buggy, shrnutí jejich nedostatků a vytvoření požadavků na nový elektromotor.

Po provedené rešerši v oblasti dostupných elektromotorů byl vybrán nový elektromotor ME1304 spolu s měničem Sevcon gen 4 size 4. Pro tyto motory a měniče bylo navrženo schéma zapojení v prototypu vozidla E-Buggy.

Dalším cílem bylo navržení okruhu chlazení, kde byl zvolen jednookruhový systém. Následovalo navržení chladiče o dostatečném výkonu pro uchlazení čtyř elektromotorů s použitím chladicí kapaliny G12+ v 50% koncentraci s destilovanou vodou. Tento chladič byl počítán pro odlišné typy podmínek, jako je pomalá jízda s nízkou účinností elektromotoru.

Poté byly navrženy jednotlivé komponenty pro uložení elektromotoru v prototypu vozidla E-Buggy. Toto uložení zahrnuje součásti pro uchycení elektromotoru, domek pro ložisko, který zároveň slouží i jako držák pro brzdový třmen a náboj pro spojení elektromotoru s kardanem. Díly byly inspirovány původním uložením tak, aby jejich hmotnost byla co nejmenší a zároveň splňovaly svou funkci. Tyto komponenty uložení budou vyrobeny na katedře materiálů a technologií pro automobily pomocí 3D modelů a vytvořených výrobních výkresů.

V experimentální části bylo potřeba navrhnout přírubu pro uchycení elektromotoru ME1304 k univerzálnímu stojanu a spojku pro spojení s motorovou brzdou. Tyto komponenty byly zkontrolovány výpočtem a vyrobeny na katedře materiálů a technologií pro automobily. Poté následovalo měření výkonu pro limit 400A, kde bylo dosaženo hodnoty 14,3 kW při 3000 ot/min a nejvyšší krouticí moment dosahoval 62,7 N·m při 800 ot/min. Další měření bylo provedeno s proudovým limitem 250A pro relativní porovnání s původním elektromotorem, kde bylo dosaženo výkonu 10,5 kW při 2800 ot/min a nejvyššího krouticího momentu 62,2 N·m při 800 ot/min. Nový elektromotor disponuje také větším spektrem otáček, téměř dvojnásobným, a proto bude i maximální rychlost E-Buggy vyšší než s původními elektromotory. To je v reálném případě zvýšení rychlosti ze 45 km/h na skoro 80 km/h.

Při testování teploty elektromotoru byly nastaveny podmínky nejprve na 400A a výkonu 14,3 kW při 2800 ot/min, kdy se po 97 sekundách dosáhlo teploty 95°C a bylo patrné, že nedojde k ustálení teploty před kritickou hodnotou 150°C. Další test probíhal za nastavených podmínek zatížení 200A a výkonu 9,4 kW při 2800 ot/min. Testování probíhalo bez ofukování chladiče a s ofukováním chladiče. Testování s ofukováním chladiče bylo ukončeno po ustálení teploty na 114°C po 673 sekundách.

Měřením účinnosti elektromotoru ME1304 bylo zjištěno, že při nastavených laboratorních podmínkách bylo dosaženo 91,7%, kdy tato hodnota byla dosažena při nižším zatížení elektromotoru s limitem 250A.

Jako další postup navrhuji výrobu dílů uložených dle 3D modelů a výkresové dokumentace, navržení elektronicky řízených ventilů pro chlazení elektromotorů s možností regulovat průtoky chladicí kapaliny pro jednotlivé elektromotory, například pro jejich vyrovnávání s ohledem na různý odpor vedení. Dále by bylo možné navrhnout komunikaci s frekvenčními měniči pomocí CAN sběrnice a možnost řídit výkon na jednotlivých elektromotorech. Toto řízení by mělo poté disponovat možností omezení točivého momentu pro jednotlivé elektromotory nebo posílat výkon na daný elektromotor, jehož kolo je právě v záběru. Tato regulace by umožňovala eliminaci posílání výkonu na kolo, které není v kontaktu s povrchem a tedy zabránění prokluzu kol.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Motor LEM200-D135 LEMCO 24-84 VDC with double magnets. In: Cloudelectric.com [online]. [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://www.cloudelectric.com/product-p/mo-lem200-d135.htm>
- [2] Electric Boat - Lynch Motor. In: Electric Tollycraft [online]. 2015 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uwa1M85q8Ao>
- [3] Home | Engiro GmbH. [online]. Copyright © 2021 ENGIRO GmbH [cit. 09.01.2021]. Dostupné z: <https://www.engiro.de/en/home>
- [4] Motors DC ME1616. Thunderstruck Motors Home [online]. Copyright © [cit.11.01.2021]. Dostupné z: https://www.thunderstruck-ev.com/me1616.html?sef_rewrite=1
- [5] motenergy.com. motenergy.com [online]. Dostupné z: <http://www.motenergy.com/>
- [6] Dana TM4 - Electric and hybrid e-drive systems. Dana TM4 - Electric and hybrid e-drive systems [online]. Copyright © Dana TM4 inc., 2021 All rights reserved. [cit. 14.01.2021]. Dostupné z: <https://www.danatm4.com/>
- [7] Motenergy motor, ME1304 Brushless, Water-Cooled. [online]. Copyright © 2014 [cit. 14.01.2021]. Dostupné z: <https://evea-kartmasters.fr/en/synchronous-motors/674-me1304-pmsm-brushless-motor.html>
- [8] [online]. Copyright © [cit. 18.03.2021]. Dostupné z: http://www.thunderstruck-ev.com/Manuals/Gen4_Product_Manual_V3.0.pdf
- [9] Repository home - University of Twente Student Theses [online]. Copyright © [cit. 18.01.2021]. Dostupné z: http://essay.utwente.nl/74337/1/Roodink_BA_RAM.pdf
- [10] Gscheidle, R. a kol. (2001): Příručka pro automechanika. SOBOTÁLES, Praha, 629 str., ISBN: 80-85920-76-X.
- [11] DSpace VŠB-TUO [online]. Copyright © [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/140792/POL0309_FMT_N3923_3911T034_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [12] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohon automobilů*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0127-6.

- [13] HUGHES, Austin, c2006. Electric motors and drives: fundamentals, types, and applications. 3rd ed. Boston: Elsevier/Newnes. ISBN 0-7506-4718-3.

- [14] DONCKER, Rik de, Duco W. J PULLE a André VELTMAN, c2011. Advanced electrical drives: analysis, modeling, control. Dordrecht: Springer. Power systems. ISBN 978-94-007-0179-3.

- [15] ROUBÍČEK, Ota, 2004. Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 807300092x.

- [16] Permanent Magnet Synchronous Motor. Engineering Solutions [online]. Copyright ©2021 Engineering Solutions [cit. 21.04.2021]. Dostupné z: <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>

- [17] Lynch Motors | Electric Boat Motors. Lynch Motors | Electric Boat Motors [online]. Dostupné z: <https://lynchmotors.co.uk/>

- [18] Chladicí kapaliny pro osobní automobily - Petrol.cz. Úvodní stránka - Petrol.cz [online]. Copyright © 2000 [cit. 21.04.2021]. Dostupné z: <https://www.petrol.cz/aktuality/archiv/2012/24/chladici-kapaliny-pro-osobni-automobily-928>

- [19] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 8073610337.

Seznam příloh

- Příloha č. 1 – Spojka-motorová brzda
- Příloha č. 2 – Uchycení-elektromotor
- Příloha č. 3 – Uložení motoru v E-Buggy
- Příloha č. 4 – Držák motoru-horní-přední
- Příloha č. 5 – Držák motoru-horní-zadní
- Příloha č. 6 – Držák motoru spodní
- Příloha č. 7 – Domek pro ložisko
- Příloha č. 8 – Náboj
- Příloha č. 9 – Fyzikální vlastnosti vody a vzduchu